



Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

2017

**José Júlio Sousa**  
**Alvarenga Galante**

**VELOCIDADE DO TRANSPORTE SEDIMENTAR: ENSAIOS DE  
LABORATÓRIO**





Universidade de Aveiro Departamento de Engenharia Civil

2017

**José Júlio Sousa  
Alvarenga Galante**

**VELOCIDADE DO TRANSPORTE SEDIMENTAR: ENSAIOS DE  
LABORATÓRIO**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil, realizada sob a orientação científica do Doutor Carlos Daniel Borges Coelho, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro.



Dedico à minha família.



## **o júri**

Presidente

Prof. Doutor Joaquim Miguel Gonçalves Macedo  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Paulo Manuel da Cruz Alves da Silva  
professor auxiliar do Departamento de Física da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Carlos Daniel Borges Coelho  
professor auxiliar do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro





## **agradecimentos**

Agradeço a todos aqueles que de alguma forma, direta ou indiretamente, positiva ou negativamente, conhecidos e desconhecidos, contribuíram em parte no processo da dissertação, fazendo com que esta se tornasse mais completa e próxima do objetivo.

Ao professor Carlos Coelho, por toda a orientação, disponibilidade, esclarecimentos, compreensão, sinceridade e simpatia, um muito obrigado.

O maior agradecimento aos meus pais, pelo apoio, dedicação e sacrifício que sempre demonstraram, apesar de todas as vicissitudes e mesmo que por vezes recaia sobre mim uma vontade efémera de abnegação.

Aos familiares mais chegados, que são sem dúvida o suporte diário mais importante de todos.

A todos os amigos que proporcionaram momentos de amizade, boa disposição e descontração, sublinhando os mais presentes no caminho académico (Redline).

Particular apreço a todos os integrantes do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, alunos, professores e funcionários que me ajudaram no decorrer do meu percurso académico.



## palavras-chave

Velocidade sedimentar, canal hidráulico, modelo físico com fundos móveis, suspensão, arrastamento no fundo.

## resumo

Os problemas associados à erosão costeira verificada em grande extensão ao longo do litoral português, mas também como questão pertinente a nível global, têm uma necessidade de resposta imediata e urgente, tendo em conta as nefastas consequências que provocam quer no habitat natural, quer nas populações próximas ao litoral.

As intervenções efetuadas nas zonas afetadas podem ser ou não conservativas, com finalidades diferentes e perspectivas a curto, médio ou longo prazo, através por exemplo, da construção de estruturas de defesa costeira, recurso a alimentações artificiais ou reperfilamento da linha de costa. Todos têm em comum, direta ou indiretamente, influência no principal processo relacionado com a erosão costeira, o transporte sedimentar.

O transporte sedimentar subdivide-se em dois tipos de movimentos relativos à linha de costa, movimento paralelo (transporte longitudinal) e movimento perpendicular (transporte transversal), contudo estes dois tipos de transporte podem ocorrer em simultâneo, devido à dinâmica das ações que provocam o transporte sedimentar.

Com vista ao estudo e avaliação do transporte sedimentar, este trabalho teve como principal objetivo estimar e caracterizar isoladamente a velocidade do transporte sedimentar, através de ensaios laboratoriais em condições controladas, com o transporte a ocorrer num único sentido. Para esse efeito, recorreu-se ao canal de hidráulica do laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro. Nos ensaios foram controlados os aspetos da dimensão dos sedimentos utilizados, o caudal escoado, a inclinação do canal, bem como o método de colocação dos sedimentos no canal (arrastamento no fundo e suspensão). Pelo tratamento analítico das medições das alturas da camada de fundo de sedimentos no canal em diferentes instantes de tempo e secções, foi possível obter a velocidade do transporte sedimentar, fazendo-se o cruzamento dos resultados obtidos para ensaios com características distintas, alcançando-se um enquadramento teórico. Foi feita ainda a análise comparativa dos volumes passados acumulados em secções designadas, com formulações numéricas de variados autores.

O trabalho realizado demonstrou que sedimentos de menor calibre adquirem velocidades de transporte sedimentar mais elevadas, ao mesmo tempo que caudais e inclinações maiores provocam também velocidades maiores. A relação entre os dois métodos de colocação dos sedimentos no canal não foi totalmente esclarecedora, ainda assim, os resultados obtidos em ambos foram semelhantes.



**keywords**

Sedimentary velocity, hydraulic flume, physical modeling with movable beds, suspended sediments, bed load transport.

**abstract**

The problems associated with coastal erosion, which are to a large extent along the Portuguese coast, but also as a relevant issue at global level, have a need for an immediate and urgent response, bearing in mind the harmful consequences that they cause both in the natural habitat and in the populations close to the coast.

Interventions in affected areas may or may not be conservative, with different aims and short, medium or long-term prospects, for example through the construction of coastal defence structures, the use of artificial sand nourishment or the reprofiling of the coastline. All of them have in common, directly or indirectly, influence in the main process related to coastal erosion, sedimentary transport.

The sedimentary process is subdivided into two types of movements related to the coastline, parallel movement (longitudinal transport) and perpendicular movement (transversal transport), however the two types of transport can occur simultaneously, due to the dynamics of the action that cause the sedimentary transport.

In order to study and evaluate sediment transport, this work had as main objective to estimate and characterize the sediment transport velocity, through laboratory tests under controlled conditions, with transport occurring in a single direction. For this purpose, we used the hydraulic flume of the laboratory of Department of Civil Engineering of the University of Aveiro. In the tests, the sediment dimension, the flow rate, the slope of the flume and the method of placement of the sediments in the flume (bed load transport and suspension) were controlled. By analytical treatment of the sediment heights in the flume at different time points and sections, it was possible to obtain sediment transport velocity by crossing the results obtained for the tests with different characteristics, reaching a theoretical framework. A comparative analysis of accumulated past volumes in designated sections was done, with numerical formulations of several authors.

The work carried out has shown that sediments of smaller calibre acquire higher sediment transport velocity, at the same time as larger flows and inclinations also cause higher velocities. The relation between the two sediment placement methods in the flume was not totally enlightening, yet the results obtained in both were similar.



## ÍNDICES

---





# Índice Geral

<b>Índice Geral .....</b>	<b>iii</b>
<b>Índice de figuras.....</b>	<b>v</b>
<b>Índice de tabelas.....</b>	<b>vii</b>
<b>Lista de símbolos .....</b>	<b>ixx</b>
Abreviaturas e acrónimos .....	ixx
Letras latinas maiúsculas.....	ixx
Letras latinas minúsculas.....	x
Letras gregas.....	xii
<b>1. Introdução .....</b>	<b>3</b>
1.1. Enquadramento.....	3
1.2. Objetivos.....	4
1.3. Estrutura da tese .....	4
<b>2. Dinâmica sedimentar.....</b>	<b>9</b>
2.1. Ações .....	9
2.1.1. Vento .....	9
2.1.2. Marés .....	10
2.1.3. Ondas .....	10
2.1.4. Correntes.....	11
2.2. Transporte sedimentar .....	11
2.2.1. Componentes de transporte .....	12
2.2.2. Posição na coluna de água .....	15
2.3. Velocidade de transporte sedimentar longitudinal .....	17
2.4. Revisão de modelos de transporte sedimentar.....	17
<b>3. Modelos físicos .....</b>	<b>23</b>
3.1. Vantagens e desvantagens .....	23

3.2.	Fundo fixo e móvel .....	24
3.3.	Exemplos de modelo de fundo móvel e mistos.....	25
3.3.1.	Estudo do transporte sedimentar longitudinal (SOGREAH) .....	25
3.3.2.	Modelação física de uma praia com estrutura de defesa costeira (FEUP) .....	26
3.4.	Caracterização do canal de hidráulica.....	27
<b>4.</b>	<b>Ensaio em canal de hidráulica .....</b>	<b>31</b>
4.1.	Procedimento experimental.....	31
4.2.	Metodologia de cálculo da velocidade de transporte sedimentar .....	33
4.2.1.	Arrastamento no fundo.....	33
4.2.2.	Suspensão.....	36
4.3.	Descrição dos elementos de ensaios .....	36
4.4.	Testes de repetibilidade.....	38
<b>5.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>47</b>
5.1.	Ensaio por arrastamento no fundo .....	47
5.2.	Ensaio por suspensão.....	55
<b>6.</b>	<b>Análise e discussão de resultados .....</b>	<b>61</b>
6.1.	Comparação de resultados entre ensaios realizados.....	61
6.1.1.	Arrastamento no fundo.....	61
6.1.2.	Arrastamento no fundo e suspensão.....	63
6.2.	Comparação com fórmulas de transporte sedimentar .....	64
6.2.1.	Arrastamento no fundo.....	65
6.2.2.	Suspensão.....	66
<b>7.</b>	<b>Considerações finais .....</b>	<b>71</b>
7.1.	Conclusões .....	71
7.2.	Desenvolvimentos futuros.....	73
	<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>77</b>

## Índice de figuras

Figura 1 - Processos de transporte sedimentar longitudinal perto da costa (adaptado de Kamphuis, 2000).....	13
Figura 2 - Taxa de transporte sedimentar longitudinal bruto e líquido (adaptado de Kamphuis, 2000) .....	13
Figura 3 - Perfis de comportamento em tempestade (esquerda) e Verão/Inverno (direita) (adaptado de Dean, 1995) .....	15
Figura 4 - Ilustração esquemática tanto do transporte por suspensão como do transporte por arrastamento no fundo (adaptado de CEDREN, 2016) .....	15
Figura 5 – Folha de cálculo do transporte sólido total (retirado de Português, 2008).....	18
Figura 6 - Esquema da experiência laboratorial (retirado de Castelle <i>et al.</i> , 2010).....	25
Figura 7 - Constituição do tanque de ondas ensaiado no laboratório de hidráulica da FEUP (retirado de Guimarães, 2014).....	26
Figura 8 - Secção transversal do canal de hidráulica (retirado de Ribeiro, 2009).....	27
Figura 9 - Pormenor dos apoios para a regulação da inclinação do canal (retirado de Ribeiro, 2009) .....	27
Figura 10 - Sistemas de bombagem e regulação de caudais (Fonte própria) .....	28
Figura 11 - Esquema em planta do CH, com representação do seccionamento do canal para efeitos de medição.....	31
Figura 12 - Marca divisória em régua de acetato .....	32
Figura 13 - Camada de sedimentos no fundo do CH, antes do início dos ensaios, $h_{si}= 2.5$ cm .....	32
Figura 14 - Silo de colocação de areia no CH, suspenso sobre a secção <i>SI</i> .....	33
Figura 15 - Esquema de trechos de registo de alturas em diferentes instantes de tempo .....	33
Figura 16 - Aproximação linear à média de alturas de sedimentos nas secções registadas no tempo (aproximação linear a tracejado e valores médios medidos a traço cheio).....	34
Figura 17 - Curvas granulométricas dos dois tipos de areias utilizados nos ensaios.....	36
Figura 18 - Alturas registadas, $h_{t,S(n)}$ , da camada no fundo do CH nas secções em diferentes instantes (cor mais clara para $t= 0$ min e cor mais escura para $t= 30$ min) de tempo para os testes <i>T1</i> a <i>T8</i> .....	40

Figura 19 - Alturas registadas, $h_{t,S(n)}$ , da camada de sedimentos no fundo do CH, nas secções e nos diferentes instantes de tempo, para <i>E01</i> a <i>E06</i> (cores claras para os instantes iniciais e cores escuras para os instante finais do ensaio) .....	47
Figura 20 - Alturas medidas (traço cheio) e aproximação linear (tracejado) nos ensaios <i>E01</i> a <i>E06</i> .....	48
Figura 21 - Velocidade de transporte dos sedimentos em intervalos de tempo de 3 minutos, ao longo dos ensaios <i>E01</i> a <i>E06</i> , para as secções <i>S22</i> (claro) a <i>S27</i> (escuro).....	49
Figura 22 - Relação entre velocidades de escoamento de cada tipo de ensaio ordenadas e velocidade de transporte dos sedimentos do ensaio correspondente .....	50
Figura 23 - Alturas registadas, $h_{t,S(n)}$ , da camada de sedimentos no fundo do CH nas secções nos diferentes instantes de tempo para <i>E13</i> a <i>E18</i> (cores claras para os instantes iniciais e cores escuras para os instante finais do ensaio) .....	51
Figura 24 - Alturas medidas (traço cheio) e aproximação linear (tracejado), nos ensaios <i>E13</i> a <i>E18</i> .....	52
Figura 25 - Velocidade de transporte dos sedimentos em intervalos de tempo de 3 minutos, ao longo dos ensaios <i>E13</i> a <i>E18</i> , para as secções <i>S22</i> (claro) a <i>S27</i> (escuro).....	53
Figura 26 - Relação entre velocidades de escoamento de cada tipo de ensaio ordenadas e velocidade de transporte dos sedimentos do ensaio correspondente .....	54
Figura 27 - Alturas registadas, $h_{t,S(n)}$ , da camada de sedimentos no fundo do CH provenientes da suspensão, nas secções nos diferentes instantes de tempo para <i>E07</i> a <i>E12</i> (cores claras para os instantes iniciais e cores escuras para os instante finais do ensaio).....	55
Figura 28 - Alturas medidas (traço cheio) e aproximação linear (tracejado), nos ensaios <i>E07</i> a <i>E12</i> realizados no CH.....	56
Figura 29 - Velocidade de transporte dos sedimentos em intervalos de tempo de 3 minutos, ao longo dos ensaios <i>E07</i> a <i>E12</i> , para as secções <i>S15</i> (claro) a <i>S20</i> (escuro).....	57
Figura 30 - Relação entre velocidades de escoamento de cada tipo de ensaio ordenadas e velocidade de transporte dos sedimentos do ensaio correspondente.....	58

## Índice de tabelas

Tabela 1 - Intervalos de valores de diferentes parâmetros das fórmulas em estudo (adaptado de Karamisheva <i>et al.</i> , 2006).....	20
Tabela 2 - Valores de diâmetros efetivos para as duas areias.....	37
Tabela 3 - Características de ensaios executados .....	37
Tabela 4 - Valores teóricos da altura de escoamento, $h_{esco.}$ e da velocidade de escoamento, $U_{esco.l. teórico}$ .....	38
Tabela 5 - Testes de repetibilidade executados .....	39
Tabela 6 – Volumes acumulados passados em $S27$ , registados no fim de cada teste de repetibilidade, $V_{t,S27}$ , e abaixamento médio da camada de sedimentos, $h_{abaixa.}$ , para cada teste correspondente ....	41
Tabela 7 - Velocidades médias ao longo do tempo de teste, entre $S22$ e $S27$ , $U_{30,S(22 a 27)}$ em $T1$ a $T8$ para diferentes alturas consideradas na área da secção transversal do fluxo sedimentar .....	42
Tabela 8 – Velocidades médias entre as secções $S22$ e $S27$ , para os ensaios de $E01$ a $E06$ .....	50
Tabela 9 - Velocidades médias entre as secções $S22$ e $S27$ para os ensaios de $E13$ a $E18$ .....	54
Tabela 10 - Velocidades médias entre as secções $S15$ e $S20$ para os ensaios de $E07$ a $E12$ .....	58
Tabela 11 - Estimativa da distância anual percorrida por cada uma das areias, $d1$ e $d2$ , para as diferentes velocidades de escoamento líquido.....	62
Tabela 12 - Estimativa do comprimento total percorrido pela areia $d1$ , para os diferentes ensaios de arrastamento no fundo e suspensão, ao longo de um ano, pela velocidade de escoamento líquido correspondente.....	64
Tabela 13 - Valores usados nos ensaios laboratoriais para os diferentes parâmetros comuns a todas as fórmulas .....	65
Tabela 14 - Comparação de resultados do caudal sedimentar transportado para os ensaios por arrastamento no fundo de $d1$ com fórmulas escolhidas da folha de cálculo.....	65
Tabela 15 - Comparação de resultados do caudal sedimentar transportado para os ensaios por arrastamento no fundo de $d2$ com fórmulas escolhidas da folha de cálculo.....	65
Tabela 16 - Comparação de resultados do caudal sedimentar transportado para os ensaios por suspensão de $d1$ com fórmulas escolhidas da folha de cálculo .....	67



## Lista de símbolos

### Abreviaturas e acrónimos

CEDREN	Center for Environmental Design of Renewable Energy
CERC	Coastal Engineering Research Center
CH	Canal de Hidráulica
FEUP	Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
IPQ	Instituto Português de Qualidade
LabCivil	Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro
SOGREAH	Société Grenobloise d'Études et d'Application Hydrauliques

### Letras latinas maiúsculas

$A$	Área da secção transversal de transporte sedimentar
$H_s$	Altura de onda significativa
$K_s$	Coeficiente de Manning-Strickler devido à rugosidade
$L$	Comprimento de onda
$Q$	Caudal sólido
$Q_g$	Caudal de transporte longitudinal bruto
$Q_l$	Caudal líquido
$Q_{net}$	Caudal líquido de transporte sedimentar longitudinal
$Q^-$	Caudal de transporte longitudinal no sentido negativo
$Q^+$	Caudal de transporte longitudinal no sentido positivo
$R_h$	Raio hidráulico
$S$	Área da secção transversal de escoamento líquido
$S_n$	Secção divisória do canal de hidráulica
$T$	Período de onda
$U_{corrente}$	Velocidade da corrente de deriva litoral
$U_{esco.l.}$	Velocidade do escoamento líquido
$U_{esco.l.teórico}$	Velocidade teórica do escoamento líquido
$U_{t,S(n)}$	Velocidade de transporte sedimentar em cada instante de tempo e secção
$U_w$	Velocidade orbital

$V_{t,S(n)}$	Volume sedimentar passado acumulado em cada instante de tempo e secção
$V_{t-1,S(n)}$	Volume sedimentar passado acumulado em cada instante de tempo anterior e secção
$V_{Ts}$	Volume total de sedimentos
$V_{\Delta t,S(n)}$	Volume sedimentar passado acumulado em cada intervalo de tempo e secção

## Letras latinas minúsculas

$a$	Altura de referência de transporte sedimentar na camada de fundo
$c$	Celeridade da onda
$d$	Profundidade
$d_s$	Diâmetro dos sedimentos
$d_1$	Areia utilizada nos ensaios proveniente da região de Ílhavo
$d_{1,50}$	Diâmetro mediano efetivo da areia $d_1$
$d_2$	Areia utilizada nos ensaios proveniente da região de Vagos
$d_{2,50}$	Diâmetro mediano efetivo da areia $d_2$
$d_{15.9}$	Diâmetro efetivo pelo qual passam 15.9 % dos sedimentos
$d_{35}$	Diâmetro efetivo pelo qual passam 35 % dos sedimentos
$d_{50}$	Diâmetro mediano efetivo dos sedimentos
$d_{75}$	Diâmetro efetivo pelo qual passam 75 % dos sedimentos
$d_{84.1}$	Diâmetro efetivo pelo qual passam 84.1 % dos sedimentos
$d_{90}$	Diâmetro efetivo pelo qual passam 90 % dos sedimentos
$h$	Altura do nível da água
$h_{abaixa.}$	Taxa de abaixamento média da camada de sedimentos no fundo
$h_{canal}$	Altura do canal de hidráulica
$h_{esco.}$	Altura de escoamento líquido em ensaio
$h_{s.esco.}$	Altura medida na superfície de escoamento líquido em ensaio
$h_{si}$	Altura inicial da camada de sedimentos no fundo
$h_{t,S(n)}$	Altura da camada de sedimentos no fundo em cada instante de tempo e secção
$h_{t,S(n-1)}$	Altura da camada de sedimentos no fundo em cada instante de tempo e na secção anterior
$h_{t,S(n)} \text{ aprox.}$	Altura corrigida da camada de sedimentos no fundo em cada instante de tempo e secção



$\bar{h}_{t,sm \text{ aprox.}}$	Altura corrigida média por secção da camada de sedimentos no fundo em cada instante de tempo
$i$	Inclinação
$l$	Comprimento de análise
$l_{canal}$	Comprimento do canal de hidráulica
$l_{st}$	Comprimento total percorrido pelos sedimentos
$l_u$	Comprimento útil
$q_b$	Caudal de transporte sólido por arrastamento no fundo
$q_s$	Caudal de transporte sólido por suspensão
$q_t$	Caudal de transporte sólido total
$q_{t,S(n)}$	Caudal de transporte sólido em cada instante de tempo e secção
$t$	Instante de análise (tempo)
$u^*$	Velocidade de atrito junto ao fundo
$u^*_{c}$	Velocidade crítica de atrito junto ao fundo
$x$	Eixo horizontal segundo a direção x
$y$	Eixo horizontal segundo a direção y
$z$	Eixo vertical segundo a direção z

## Letras gregas

$\Delta$	Altura da forma de fundo
$\Delta \bar{h}_{sm}$	Diferença média de alturas entre $\bar{h}_{t,sm \text{ aprox.}}$ e $h_{t,S(n)}$
$\Delta t$	Intervalo de tempo de análise
$\Delta t_{total}$	Intervalo de tempo total de ensaio
$\omega$	Frequência de onda



## Capítulo 1

---

# INTRODUÇÃO



# **1. Introdução**

O desenvolvimento das zonas costeiras a nível mundial tem aumentado a preocupação com a necessidade da sua preservação nas últimas décadas. Paralelamente, a tentativa de prever a posição futura da linha de costa, com consideração da dinâmica sedimentar e ações naturais e/ou antropogénicos, assumiu uma importância extrema (Heinz Center, 2000). Sob o ponto de vista da dinâmica sedimentar, uma das principais componentes, é o transporte litoral de sedimentos, que se divide nas componentes de transporte longitudinal e transversal (CERC, 2001). Este trabalho estuda a velocidade do transporte sedimentar e neste capítulo apresenta-se o respetivo enquadramento, objetivos e estrutura da tese.

## **1.1. Enquadramento**

As zonas costeiras à volta de todo o mundo apresentam uma grande variedade em morfologia, processos naturais e processos relacionados com a atividade humana. Alguns destes locais experienciam turismo intensivo, com sobre desenvolvimento e poluição, e outros, em que a propriedade privada e importantes habitats naturais são ameaçados por erosão. Em comum, carecem de uma intervenção mais ou menos conservativa no tempo, de modo a evitar uma maior deterioração a curto, médio ou longo prazo (Arthurton, 1995).

Apesar de existirem aspetos muito importantes para a gestão costeira, tais como o meio ambiente, transporte, economia, biologia entre outros, o que é mais considerado regularmente como de relevância máxima em projetos de gestão costeira é o transporte de sedimentos, pois a escassez de sedimentos pode resultar em consequências erosivas (Kamphuis, 2000). As soluções encontradas para a mitigação de problemas relacionados com a erosão costeira passam pela construção de estruturas de defesa costeira de diferentes tipos e finalidades, com ação direta ou indireta na questão do transporte sedimentar. As alimentações artificiais podem ser consideradas intervenções de estrutura flexível, que poderão ser combinadas com estruturas rígidas, como quebra-mares e esporões, para uma capacidade de defesa mais efetiva, passando assim a serem designados como estruturas combinadas (Kraus, 2005).

No estudo de raiz do processo de erosão costeira, o transporte sedimentar revela-se fundamental. Por sua vez, o transporte sedimentar longitudinal será em comparação ao transporte sedimentar transversal mais significativo e pertinente nas análises a médio e/ou longo termo, devido às consequências até agora registadas, associado aos efeitos das correntes e das ondas que incidem sobre a linha de costa. A análise da velocidade dos

sedimentos transportados será refletida como um contributo na capacidade de perceção, por exemplo, do tempo de permanência de uma alimentação artificial de sedimentos de uma praia e/ou avaliação da necessidade de recargas deste tipo de intervenção costeira.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal da dissertação foi o estudo da velocidade do transporte sedimentar, por ensaios realizados no canal de hidráulica (CH) do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (LabCIVIL). Nos ensaios procedeu-se à monitorização e registo das alturas da camada de sedimentos depositada no fundo do CH. Realizaram-se diversos ensaios com o objetivo de avaliar a importância de diferentes variáveis que poderiam influenciar a velocidade de transporte de sedimentos. Fizeram-se testes com diferentes métodos de colocação dos sedimentos no CH e dimensão das partículas, caudais de escoamento líquido e inclinações do CH, que permitiram determinar os diferentes níveis de influência destes mesmos aspetos. Existiu assim a possibilidade de se fazer um enquadramento dos resultados registados com o que ocorre na realidade ao longo das zonas costeiras e com formulações numéricas existentes.

## **1.3. Estrutura da tese**

Esta dissertação é composta por sete capítulos, subdivididos em diversas secções, que pretendem dar noção dos aspetos mais importantes, necessários na avaliação da velocidade de transporte sedimentar, com conteúdo teórico e prático relevante. No presente capítulo, é feita uma breve introdução/enquadramento ao tema apresentado e os objetivos propostos na dissertação.

No capítulo dois aborda-se a questão primária da dinâmica sedimentar na costa, englobando uma breve referência às ações que lhe estão inerentes. De seguida o transporte sedimentar é teorizado, com a explicação das componentes do transporte sedimentar longitudinal e transporte sedimentar transversal, bem como dos principais modos de transporte (arrastamento no fundo e suspensão). Retrata-se ainda a velocidade de transporte sedimentar. Por último, apresenta-se uma revisão de modelos de transporte sedimentar, por formulações numéricas, com a finalidade de comparação com os resultados obtidos ao longo dos ensaios laboratoriais.

No capítulo três refere-se o método físico como meio de abordagem de estudo de processos sedimentares costeiros, apresentando-se as vantagens e desvantagens em comparação com

outros métodos. São também apresentados tipos de modelação física existentes e no final do capítulo, faz-se a caracterização do canal hidráulico a utilizar no trabalho laboratorial desenvolvido nesta dissertação. O modelo físico serviu de base ao estudo das vertentes inerentes ao transporte sedimentar, por efeito de corrente.

Com vista à caracterização da velocidade de transporte sedimentar, no capítulo quatro são apresentadas as técnicas e procedimentos laboratoriais executadas nos ensaios, explicada a metodologia de cálculo da velocidade de transporte sedimentar para os ensaios de arrastamento no fundo e em suspensão, bem como as principais conclusões dos resultados alcançados pelos testes de repetibilidade efetuados. Procedeu-se à repetição prévia de alguns ensaios para validar os resultados obtidos e para avaliar a forma de interpretar esses resultados no desenvolvimento do trabalho.

O quinto capítulo está assente exclusivamente na explanação de todos os resultados obtidos ao longo dos ensaios laboratoriais, quer os ensaios por arrastamento no fundo, quer em suspensão.

No sexto capítulo é realizada uma análise e discussão comparativa dos resultados dos ensaios de arrastamento no fundo de dois tipos de areia utilizada, e entre os resultados obtidos para arrastamento no fundo e em suspensão para uma das areias. É também efetuada uma comparação entre os volumes transportados alcançados nos ensaios, com as formulações numéricas revistas no capítulo 2, para os dois tipos de ensaio (arrastamento no fundo e suspensão).

Por último, no sétimo capítulo, são feitas todas as considerações finais sobre a dissertação realizada e são ainda apresentadas propostas para possíveis desenvolvimentos futuros deste trabalho.





## Capítulo 2

---

# DINÂMICA SEDIMENTAR



## **2. Dinâmica sedimentar**

A forma da costa é moldada por uma grande variedade de processos, habitualmente considerados em estudos e análises de forma individual, apesar de na prática ser suscetível aos diversos processos que atuam simultaneamente ou em sequência. A costa pode ser composta por rochas ou sedimentos, e o movimento dos sedimentos é de primeira importância na morfodinâmica costeira, considerando os processos envolvidos de erosão, transporte e depósito de material (Woodroffe, 2002).

Os processos erosivos ao longo da linha de costa incluem: 1) os efeitos diretos de ações hidráulicas, intrusão e cavitação das ondas; 2) abrasão, usando a areia, cascalho ou rochas como ferramentas; 3) atrito entre as próprias partículas durante a execução abrasiva; 4) bioerosão, por organismos; 5) ataques químicos ou corrosão, entre outros. Contudo, são as ondas (ponto 1), que são a força mais dominante causadora de erosão costeira, associadas ainda a correntes, ventos e marés (Rampino, 2005).

Existe assim uma necessidade urgente de compreensão de toda a dinâmica referente a processos costeiros, com foco no transporte sedimentar, até porque mais de 70% das costas arenosas à volta de todo o mundo, estão categorizadas como praias passíveis de erosão (Sato, 2000).

### **2.1. Ações**

Existe uma gama de ações responsáveis pela dinâmica imposta na costa, que engloba desde ações representativas do meio natural até ações antropogénicas. Todas têm consequências visíveis no litoral, em escalas e desfechos diferentes. Assim sendo, tendo como foco principal o transporte de sedimentos no litoral, considera-se que as ações que se descrevem sucintamente de seguida são as mais pertinentes e merecem uma breve referência no âmbito deste trabalho.

#### **2.1.1. Vento**

O vento gerado sobre a superfície do mar é uma importante força motriz para o oceano. A sobrecarga do vento produz uma resposta local confinada quase exclusivamente a uma fina camada perto da superfície do oceano (camada de Ekman) e oscilações de corrente, que se propagam horizontalmente e verticalmente quase como ondas inerciais (Gill, 1984). Nas regiões costeiras, a força exercida pelo vento pode diferir dos ventos em mar aberto, devido à presença do litoral e profundidades relativamente baixas. O movimento da água realizado

na zona da camada de Ekman produzido pelo vento pode levar a *upwelling* (processo de subida natural de águas profundas) ou a *downwelling* (processo de descida natural de águas superficiais) ao longo da costa. Os processos agora referidos fazem do vento um produtor importante de correntes e ondas (Brink, 1991).

### **2.1.2. Marés**

As marés podem ser designadas como marés astronómicas ou marés meteorológicas. A primeira resulta da força gravitacional variável imposta pela Lua e pelo Sol sobre a Terra, em que o nível dos oceanos varia quase periodicamente. Apesar do Sol ter uma massa maior em relação à Lua, esta por estar mais perto da Terra exerce uma força aproximadamente duas vezes superior à do Sol, tendo marés com períodos aproximadamente de 12.25 e/ou 24.5 horas. As marés têm uma variação considerável de lugar para lugar, com respeito ao intervalo de período e à forma. Sempre que a posição da Lua coincide ou é oposta à posição do Sol, originam-se as chamadas marés vivas (Sizígia), devido à maior ação gravitacional exercida que provoca marés com maiores amplitudes. Ao invés, quando a posição da Lua relativamente ao Sol forma um quadrado de um círculo, originam as marés mortas (Quadratura), com menor ação gravitacional e consequentes marés de menor amplitude (Nielsen, 2009). Marés meteorológicas resultam de ventos fortes e persistentes, designados como *wind setup*, centros de altas e baixas pressões e de agitação intensa e persistente, designada *wave setup*. De um modo geral, as marés originam dois tipos de movimentos da água, movimentos verticais (marés) e movimentos horizontais (correntes de maré) que se associam às restantes correntes marítimas como um dos fenómenos responsáveis pelo transporte sedimentar (Coelho, 2005).

### **2.1.3. Ondas**

As ondas desempenham um papel fundamental no transporte dos sedimentos depositados ou suspensos perto da linha de costa. O transporte e transmissão sedimentar são consequência de correntes estáveis e constantes (correntes induzidas), tais como correntes longitudinais e contracorrentes. A assimetria das velocidades abaixo da crista da onda e pelo canal da onda é uma outra fonte de transporte líquido dos sedimentos. As principais componentes da onda são o comprimento de onda ( $L$ ), altura de onda ( $H$ ), período de onda ( $T$ ), frequência de onda ( $\omega$ ), celeridade ( $c$ ) e velocidade orbital ( $U_w$ ). As ondas podem ser geradas tanto devido ao efeito de ventos locais que sopram sobre a superfície da água numa determinada distância em que podem atuar (*Fetch*) ao longo do tempo, como geradas por

distantes tempestades usualmente com períodos de onda mais longos, mas menor propagação do período e direção, designado como *swell* (Soulsby, 1997).

As órbitas descritas pelas partículas de sedimentos pelo efeito das ondas são diferentes consoante a profundidade ( $d$ ) existente. Se a zona em questão tiver uma profundidade considerada média ( $0.05 < d/L < 0.5$ ), as partículas descreverão na água uma trajetória elíptica de largura aproximadamente constante, tal como se verifica em pequenas profundidades ( $d/L < 0.05$ ). No caso de grandes profundidades ( $d/L > 0.5$ ), a trajetória descrita é circular, afunilando na direção do fundo (Coelho, 2005).

#### **2.1.4. Correntes**

As correntes são originadas no oceano, em baías adjacentes e lagunas. As correntes podem ser geradas por marés, ventos, ondas, bem como devido a mudanças de temperatura ou salinidade (CERC, 2001). Para o transporte sedimentar e desenvolvimento morfológico na região costeira, as correntes induzidas pelas ondas assumem uma importância relevante. Estas correntes são originadas pela rebentação das ondas, associadas a fluxos de energia da onda e gradientes de pressão, dinamizados pelo fundo da zona de rebentação, produzindo correntes longitudinais e correntes de retorno *offshore* junto da camada baixa (Van Rijn, 1998).

### **2.2. Transporte sedimentar**

O material sedimentar movido por ondas, correntes e vento, na zona litoral, tem como designação deriva litoral e o seu movimento é designado por transporte litoral (CERC, 2001). O transporte litoral pode ser dividido em transporte sedimentar longitudinal (paralelo à costa) e transporte sedimentar transversal (perpendicular à costa). Por sua vez, o movimento sedimentar pode resultar em erosão ou acreção, remoção ou adição de volume de sedimentos respetivamente, sendo que a erosão resulta normalmente numa recessão da posição de linha de costa, enquanto a acreção provoca o avanço da posição de linha de costa em direção ao mar (Kamphuis, 2000).

O transporte sedimentar ocorre num complexo padrão tridimensional, variando rapidamente no tempo, pelo que a separação de todo o processo de transporte em duas componentes, paralela e perpendicular à costa, é artificial e é considerada como uma abordagem conveniente para uma mais simples perceção de um ambiente extremamente complexo (Seymour, 2005b). Normalmente estão associadas duas escalas temporais na análise do transporte sólido, o curto e o longo prazo, respetivamente referentes ao transporte

transversal e longitudinal. A curto termo a análise refere-se a períodos ocasionais como tempestades ou verão/inverno, originando mudanças mais notórias no perfil transversal da costa, enquanto que a longo termo remete para análise que cobre anos de dados obtidos, consequentemente para mudanças no perfil longitudinal, ao longo da costa (Kamphuis, 2000).

### **2.2.1. Componentes de transporte**

Como já referido previamente, as componentes de transporte de sedimentos dividem-se em dois tipos, transporte sedimentar longitudinal e transporte sedimentar transversal. Estas componentes apresentam características diferentes e realisticamente indissociáveis, pelo que existe assim a necessidade de compreensão de cada componente, para uma perceção de todo o processo de transporte sedimentar, com maior pormenorização na componente longitudinal, elemento de estudo principal desta dissertação.

#### **2.2.1.1. Transporte sedimentar longitudinal**

O transporte sedimentar longitudinal refere-se ao movimento longitudinal aparente de sedimentos da costa e sedimentos paralelos a esta na zona designada como *nearshore*, pela combinação de ações de correntes, marés, ondas e ventos. Estas forças resultam habitualmente num movimento contínuo de sedimentos, quer seja por suspensão, quer seja por arrastamento das partículas no fundo (Seymour, 2005b).

De uma maneira geral, as ondas fazem a aproximação à costa num determinado ângulo oblíquo que irá mover os sedimentos ao longo da costa com a direção da propagação da onda, resultando em dois tipos de mecanismos (Figura 1): 1) na zona de espraimento a ação da onda empurra a areia para a zona interior da praia na direção da onda (ângulo oblíquo), e quando a onda recua as partículas são aceleradas pela gravidade e descem a encosta formada, numa direção perpendicular à costa; 2) na zona de rebentação a turbulência coloca os sedimentos em suspensão e estes são transportados paralelamente à costa pela corrente gerada pelo momento de rebentação das ondas (correntes longitudinais). Contudo, a mesma turbulência e corrente transportam também os sedimentos presentes na camada junto ao fundo, ou seja, as ondas e as correntes longitudinais provocadas por estas são as duas principais ações do transporte sedimentar longitudinal (Kamphuis, 2000). Existem ainda na zona de rebentação, correntes com uma direção transversal à costa, designadas por correntes de retorno, o “*undertow*” (Fredsoe & Deigaard, 1992). O mecanismo referido em 1) confirma que a análise a curto termo também faz parte do estudo

do transporte sedimentar longitudinal, contudo o transporte é mais significativo a longo prazo (Fredsoe & Deigaard, 1992). Assim sendo, o transporte depende essencialmente da direção de aproximação da onda, do ângulo entre a onda e a linha de costa, da duração e energia da onda (CERC, 2001).



Figura 1 - Processos de transporte sedimentar longitudinal perto da costa (adaptado de Kamphuis, 2000)

Medições feitas ao transporte de sedimentos na linha de costa sugerem que o transporte máximo ocorre perto da zona de rebentação das ondas, mas também na zona de espraçamento (Thornton & Abdelrahman, 1991). Devido a reversões existentes na direção do transporte longitudinal e porque diferentes tipos de ondas transportam diferentes quantidades de sedimentos, duas componentes na taxa de sedimentos transportados tornam-se importantes na avaliação do transporte sedimentar longitudinal (CERC, 2001). Do ponto de vista de um observador paralelo à costa do lado do mar, as ondas provenientes da esquerda fazem o transporte longitudinal para a direita,  $Q^+$ , do mesmo modo as ondas provenientes da direita fazem o transporte de sedimentos para a esquerda,  $Q^-$ . Então a soma da quantidade dos dois é designada como transporte longitudinal bruto,  $Q_g$ , enquanto que a diferença se designa por transporte longitudinal líquido,  $Q_{net}$ , ambos referidos a um determinado período de tempo (Kamphuis, 2000). Segue-se a ilustração da taxa de transporte (Figura 2):

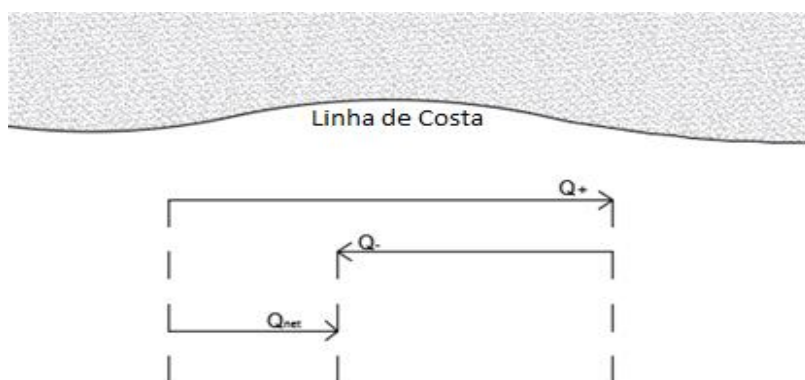


Figura 2 - Taxa de transporte sedimentar longitudinal bruto e líquido (adaptado de Kamphuis, 2000)

Os gradientes de transporte sedimentar longitudinal são responsáveis por mudanças a médio e longo prazo na posição da linha de costa (Rodrigues, 2010).

#### **2.2.1.2. Transporte sedimentar transversal**

O transporte sedimentar transversal refere-se ao movimento transversal aparente dos sedimentos, ou seja, movimento perpendicular à linha de costa, pela combinação de ações de marés, vento e ondas, bem como das correntes perpendiculares à costa produzidas pelas ondas. A qualquer momento, alguns dos sedimentos numa área específica, terão um movimento perpendicular de afastamento da costa, enquanto os outros sedimentos terão um movimento contrário, de aproximação à linha de costa. Este tipo de transporte pode resultar em alterações visíveis na configuração de uma praia em intervalos tão curtos como um dia (Seymour, 2005a). No transporte sedimentar tanto ocorre a componente de transporte de sedimentos por afastamento da costa (exemplo do que acontece durante tempestades, provocando erosão), como ocorre o transporte de sedimentos por aproximação da costa, como resultado de longos períodos de atividade de ondas baixas, provocando acreção (Figura 3). Estes comportamentos têm modos distintos e escalas de tempo marcadamente díspares, o que os torna de difícil previsão. O transporte que ocorre por via de tempestade, tende a acontecer com grande rapidez e como um processo mais regular com transporte mais ou menos equilibrado ao longo de todo o perfil ativo (zona do perfil onde ocorrem alterações da batimetria/morfologia do perfil transversal) com um grande potencial de danificação de estruturas e perda de sedimentos (Inverno), enquanto que o transporte potenciado pela ação prolongada de agitação menos energética ocorre num processo mais lento e gradual, no qual bolsas individuais de areia movem-se em direção à praia na zona interior de areia seca onde se misturam e se estendem com esta (Verão).

O transporte sedimentar transversal tem a contribuição das componentes de transporte por suspensão e por arrastamento no fundo, dependendo do tamanho dos grãos, da energia da onda, da inclinação do talude, entre outros. A componente transversal do transporte não é totalmente dissociável do transporte sedimentar longitudinal, tendo este uma componente transversal (Dean, 1995).



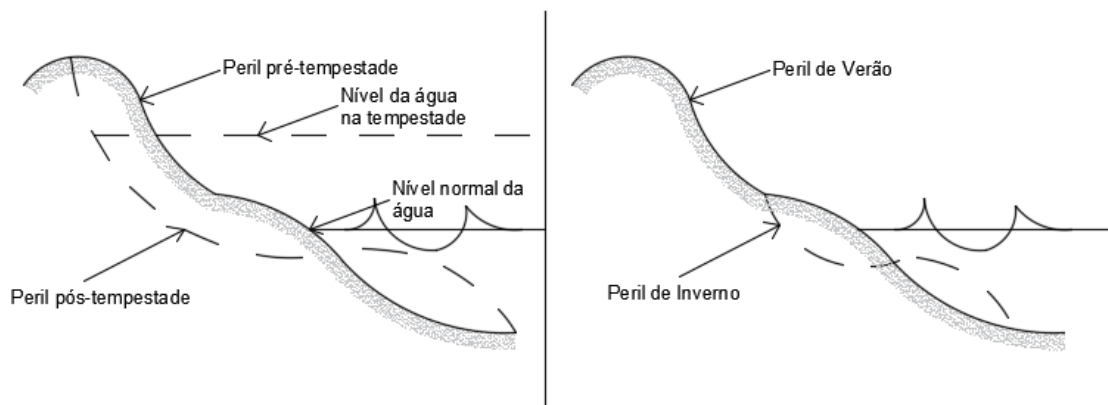


Figura 3 - Perfis de comportamento em tempestade (esquerda) e Verão/Inverno (direita) (adaptado de Dean, 1995)

### 2.2.2. Posição na coluna de água

Os métodos de transporte dos sedimentos em função da sua posição na coluna de água conhecidos são o transporte por suspensão e por arrastamento no fundo e ocorrem frequentemente ao mesmo tempo (Figura 4), gerando uma ligação recíproca de envolvimento de grande complexidade.

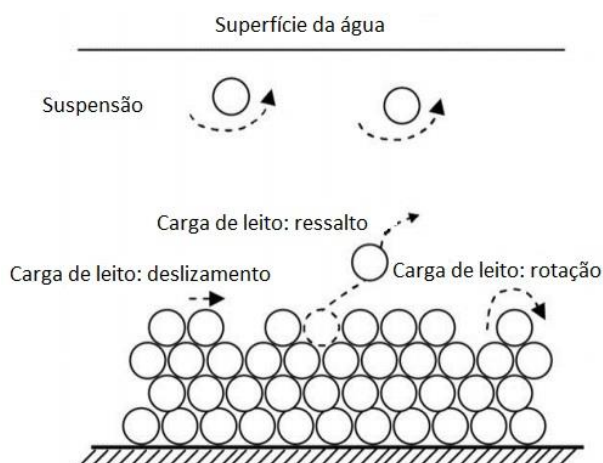


Figura 4 - Ilustração esquemática tanto do transporte por suspensão como do transporte por arrastamento no fundo (adaptado de CEDREN, 2016)

#### 2.2.2.1. Transporte por suspensão

Resultado da tensão da água em cada grão de sedimento individual, mantendo-o em suspensão, o transporte em suspensão processa-se com partículas de dimensão mais pequena como siltes ou argilas, por vezes em longos períodos de tempo e longas distâncias, formando uma subcamada designada como *washload*, antes de assentarem de novo (Atkins, 1993). Este tipo de transporte de sedimentos processa-se devido a rebentação das ondas e correntes, em áreas referenciadas como a zona de rebentação e a zona de espraçamento.

Inicialmente todas as partículas serão suspensas após a movimentação que a provoca, mas pouco depois, qualquer excesso de sedimentos suspensos assenta na primeira camada de fundo, com os sedimentos restantes que permanecem suspensos a serem transportados. Este sistema remete também para um processo designado como *sheet flow*, processo este que conjuga o transporte por suspensão com o transporte por arrastamento no fundo (Nielsen, 2009). Van Rijn (1998) divide o transporte por suspensão em três tipos: 1) suspensão em vórtice na ondulação – o afluxo de ondas sem rebentação, com uma altura de onda relativa  $H_s/h=0.2-0.4$ , sendo  $H_s$  altura de onda significativa e  $h$  altura de nível da água, sobre a camada de ondulação, gera um forte movimento do vórtice entre as cristas da onda. Neste caso, os sedimentos são mobilizados pelos vórtices durante a fase *onshore*, subsequentemente os sedimentos são ejetados para cima na reversão do fluxo e numa corrente horizontal de direção *offshore*, prosseguindo então na direção *onshore* enquanto se difundem gradualmente e assentam; 2) suspensão em vórtice de rebentação – as ondas rebentadas na zona de rebentação ( $H_s/h=0.4-1$ ) geram violentos vórtices e turbulência que facilmente pode suspender os sedimentos; 3) suspensão de corte – a mistura de sedimentos devido à presença de ondas/correntes induzidas provoca gradientes de velocidade vertical perto da camada limite de fundo.

O transporte de sedimentos por suspensão é dominante em relação ao transporte por arrastamento no fundo, sempre que se verifica uma velocidade de corrente relativamente alta e partículas suficientemente finas, ou seja, a velocidade de atrito excede a velocidade de queda das partículas (Silva, 2010).

#### **2.2.2.2. Transporte por arrastamento no fundo**

O transporte por arrastamento no fundo é o resultado de colisões entre grãos de sedimentos individuais. Este tipo de transporte sedimentar ocorre geralmente com sedimentos de grande dimensão como areias, cascalhos ou seixos, pois estes sedimentos provocam o movimento uns aos outros, numa fina camada plana de sedimentos junto ao fundo, caso contrário a água teria que se movimentar rapidamente durante longos períodos de tempo para os manter suspensos (Atkins, 1993). Este transporte é predominante em áreas onde as correntes têm uma força de ação fraca em comparação com o movimento das ondas. Pesquisas de campo encontraram evidências de que o transporte por arrastamento no fundo acontece frequentemente em linhas de costa frontais expostas a mar aberto com profundidades até oitenta metros, contudo é menos expressivo que o outro processo de transporte por suspensão, ou seja, a taxa de transporte é menor (Van Rijn, 1998).

### **2.3. Velocidade de transporte sedimentar longitudinal**

A dificuldade intrínseca à medição da velocidade de transporte sedimentar longitudinal, prende-se pela complexidade dos processos que o acompanham, já abordados anteriormente, tais como as características de agitação marítima, a velocidade das correntes longitudinais induzidas, passando pelos tipos de transporte na coluna de água.

Na zona de rebentação, o fluxo de energia das ondas e as tensões de radiação diminuem no sentido da costa, anulando-se junto à linha de costa. A variação do fluxo do momento é compensada por um gradiente de pressão e pelas tensões de atrito junto ao fundo associadas a uma corrente média. Nesta zona, as ondas de superfície têm a capacidade de induzir correntes de elevada intensidade com um papel fundamental no transporte de sedimentos e na evolução morfológica de praias (Silva, 2010).

As correntes envolvidas no transporte sedimentar longitudinal são maioritariamente correntes longitudinais induzidas, que implicam um sistema de inúmeras variáveis, influenciadas por efeitos tão diferentes como: ondas irregulares, vento, momentos variáveis, perfis barreira, entre outros (Fredsoe & Deigaard, 1992).

Assim sendo, aspetos da agitação marítima como a altura de onda ou o ângulo de incidência da onda em relação à linha de costa, tomam uma importância relevante. Na zona de rebentação, para alturas de ondas maiores, o caudal sólido de transporte longitudinal aumenta, da mesma forma que, para maior obliquidade do ângulo de incidência, maior será o transporte (Guimarães, 2014). Com base na distribuição da velocidade da corrente, a velocidade de transporte dos sedimentos é tanto maior, quanto maior forem os efeitos de fluxos e radiações, que por sua vez aumentam com alturas de onda e ângulos de incidência (maior obliquidade), de forma paralela com o transporte sedimentar (Silva, 2010).

### **2.4. Revisão de modelos de transporte sedimentar**

Na revisão da bibliografia realizada não se encontraram formulações diretamente relacionadas com a velocidade sedimentar, que possibilitassem comparar resultados em laboratório com resultados formulados, pelo que se fez uma comparação entre o caudal transportado estimado por formulações com o caudal sólido,  $Q_{st}$ , obtido ao longo dos ensaios previstos. Assim sendo, a estimativa dos caudais sólidos terá por base as formulações numéricas programadas (folha de cálculo) por Português (2008). Esta folha de cálculo considera diversas metodologias de cálculo do transporte sedimentar, que por sua

vez se distinguem pelos diferentes parâmetros que intervêm na sua determinação, permitindo uma rápida comparação de resultados.

Na folha de cálculo, a avaliação do transporte sedimentar está dividida nas componentes de transporte por arrastamento, transporte por suspensão e pode também considerar-se o transporte total, sendo o último uma conjugação do transporte por arrastamento e suspensão.

De acordo com Português (2008), a folha de cálculo para o transporte total está programada com sete fórmulas diferentes, (fórmula de *Shen e Hung*, fórmula de *Eugelund e Hansen*, fórmula de *Ackers e White*, fórmula de *Ackers e White* revista, fórmula de *Karim e Kennedy*, fórmula de *Karim e Kennedy* revista e fórmula de *Van Rijn*) (Figura 5).

 ESPAÇOS A PREENCHER


PROGRAMAÇÃO DE MODELOS DE TRANSPORTE SEDIMENTAR COMPARAÇÃO DE SOLUÇÕES	
TRANSPORTE SÓLIDO TOTAL	
<b>Transporte sólida total</b>	
<b>Fórmula de Shen e Hung</b>	
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir U
<b>Fórmula de Eugelund e Hansen</b>	
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir g
<b>Fórmula de Ackers e White</b>	
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir g
<b>Fórmula de Ackers e White (revisto)</b>	
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir R
<b>Fórmula de Karim e Kennedy (revisto)</b>	
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir R
<b>Fórmula de Van Rijn</b>	
Caudal sólido arrastado (volume)	$q_b$ (m <sup>3</sup> /s) Escolher método de cálculo
Caudal sólido em suspensão (volume)	$q_s$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir h
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Introduzir dados
<b>Método de cálculo:</b>	
Caudal sólido total (volume)	$q_t$ (m <sup>3</sup> /s) Escolher método de cálculo

Figura 5 – Folha de cálculo do transporte sólido total (retirado de Português, 2008)

As fórmulas referidas estão descritas nas equações 01 a 08.

*Shen e Hung*, em 1971, ao aplicar uma regressão múltipla a 514 registos coerentes de dados de laboratório e a 63 registos de dados de rios, obtiveram a seguinte fórmula de transporte sólido total (Cardoso, 1998).

$$q_t = \frac{C_{sppm}}{(C_{sppm} - 1)s - C_{sppm}} \quad (01)$$

*Eugelund e Hansen*, em 1972, conceberam um método originalmente criado para determinar o transporte total por arrastamento em dunas, mas atualmente aplicado, e razoavelmente preciso, como fórmula de estimativa do caudal sólido total,  $q_t$  (Português, 2008).

$$q_t = \frac{0.04 C_d^{3/2} U^5}{[g(s - 1)^2] D_{50}} \quad (02)$$

*Ackers e White*, em 1973, propuseram o cálculo do transporte sólido total considerando o transporte por arrastamento e suspensão separadamente, relacionando cada um dos modos de transporte através de coeficientes empíricos, mediante um intervalo de  $1 < D_* \leq 60$  e utilizando como referência o  $D_{35}$  para caracterizar a dimensão dos sedimentos. Baseando-se em dados mais recentes, em 1990 foi revista e sofreu alterações nesses mesmos coeficientes empíricos (Soulsby, 1997).

$$q_t = C_{aw} U D_{35} \left( \frac{U}{u_*} \right)^n \left( \frac{F_{aw} - A_{aw}}{A_{aw}} \right)^m \quad (03)$$

*Karim e Kennedy*, em 1981, através da análise de valores conhecidos de vinte e um parâmetros adimensionais independentes obtidos de rios e canais de laboratório, deduziram a seguinte fórmula de transporte sólido total (Cardoso, 1998).

$$\begin{aligned} \log \left[ \frac{q_t}{\sqrt{g(s - 1) D_{50}^3}} \right] = & -2.279 + \log \left[ \frac{U}{\sqrt{g(s - 1) D_{50}}} \right] + \\ & + 1.06 \log \left[ \frac{U}{\sqrt{g(s - 1) D_{50}}} \right] \log \left[ \frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s - 1) D_{50}}} \right] + \\ & + 0.299 \log Z_{50} \log \left[ \frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s - 1) D_{50}}} \right] \end{aligned} \quad (04)$$

Posteriormente, em 1990, sugeriram uma nova fórmula de transporte sólido total mais simples, que apresenta precisões muito semelhantes à equação anterior sempre que a velocidade de atrito no fundo,  $u_*$ , é significativamente superior à velocidade crítica de atrito

no fundo,  $u_{*c}$ , obtendo-se menor rigor para condições próximas das do início do movimento (Cardoso, 1998).

$$\log \left[ \frac{q_t}{\sqrt{g(s-1)D_{50}^3}} \right] = 0.00151 \left[ \frac{U}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right]^{3.369} \left[ \frac{u_* - u_{*c}}{\sqrt{g(s-1)D_{50}}} \right]^{0.84} \quad (05)$$

*Van Rijn*, em 1984, propôs uma fórmula para o cálculo do transporte sólido total baseada na soma das parcelas correspondentes ao transporte por arrastamento (equação 07),  $q_b$ , e em suspensão (equação 08),  $q_s$  (Português, 2008).

$$q_t = q_s + q_b \quad (06)$$

$$q_b = \left( 0.05 T^{0.21} / D_*^{0.3} \right) \sqrt{[g(s-1)]} D_{50}^{1.5} \quad (07)$$

$$q_s = F_r U h C_a \quad (08)$$

Para cada fórmula existe a necessidade de definir dados de entrada que permitam a sua aplicação, tais como a profundidade, inclinação, diâmetro das partículas, viscosidade, velocidade de escoamento, velocidade de corte e velocidade de queda, entre outras.

Karamisheva *et al.* (2006) apresenta intervalos de valores adequados para a profundidade, inclinação, diâmetro das partículas e velocidade de escoamento para a utilização das fórmulas apresentadas, que servirão de comparação com as características e condições de ensaio a realizar (tabela 1).

Tabela 1 - Intervalos de valores de diferentes parâmetros das fórmulas em estudo (adaptado de Karamisheva *et al.*, 2006)

	Profundidade $d$ (m)	Inclinação $i$ (%)	Diâmetro das partículas $d_s$ (mm)	Velocidade de escoamento $U_{esco}$ (m/s)
<b><i>Shen e Hung</i></b>	1.5-62.2	0.0002-0.25	0.02-57	--
<b><i>Euglund e Hansen</i></b>	0.06-0.31	0.0055-1.9	0.19-0.93	0.19-1.9
<b><i>Ackers e White</i></b>	0.18-11.5	0.0022-0.15	0.04-4	0.33-0.87
<b><i>Karim e Kennedy</i></b>	0.03-5.2	0.015-2.4	0.14-28.65	0.31-2.84
<b><i>Van Rijn</i></b>	0.10-16	--	0.19-3.6	0.34-1.55

## Capítulo 3

---

# MODELOS FÍSICOS





### **3. Modelos físicos**

A engenharia costeira conta com três técnicas complementares para lidar com os processos complexos típicos de regimes de fluxo de fluídos acompanhados por estruturas naturais ou antropogénicas: medições e observações de campo, medições e observações laboratoriais e cálculos matemáticos. Aos estudos laboratoriais dá-se o nome de modelos físicos porque são frequentemente reproduções em miniatura (escala reduzida) do verdadeiro sistema físico. Em paralelo ao modelo físico está o modelo numérico, que é a representação matemática do sistema físico (Hughes, 1993). Para Dalrymple (1985), os estudos de campo fornecem a melhor base de dados, mas são normalmente dispendiosos e existem demasiadas variáveis presentes na natureza, o que os torna de difícil interpretação. Por outro lado, os modelos físicos são mais pequenos, menos dispendiosos, de estudo mais fácil e mais simples que a natureza, mas ainda assim incluem os aspetos mais importantes do problema em estudo (Kamphuis, 1991). Quanto aos modelos numéricos, são de grande conveniência para cálculos preditivos de sistemas dinâmicos, contudo muitas condições relacionadas com o escoamento, turbulência, falta de informação da rebentação de ondas ou problemas de engenharia costeira não são obedientes às análises matemáticas devido ao seu carácter não linear (Keulegan, 1966). Muitas das soluções encontradas passam pela complementaridade entre os modelos físicos e numéricos, estando o último como que refém do primeiro, indispensável pela sua capacidade de facultar calibração e verificação da base de dados para o modelo numérico (Kamphuis, 1991).

#### **3.1. Vantagens e desvantagens**

Para Le Méhauté (1990) existem cinco importantes razões para a continuação do uso do modelo físico para estudo e resolução de problemas de engenharia costeira: 1) os modelos de escala continuam a ser rentáveis considerando o tamanho e a magnitude dos projetos costeiros; 2) as técnicas laboratoriais usadas em experiências permaneceram sempre como uma das ferramentas mais úteis na engenharia costeira em virtude dos limites inerentes determinísticos da mecânica dos fluídos devido à turbulência; 3) a exatidão dos modelos matemáticos é limitada pela precisão de relações matemáticas fundamentais em que estes estão baseados, pelo que o modelo matemático aponta as principais deficiências e o modelo físico tem a oportunidade de as monitorizar e medir num ambiente controlado; 4) os modelos de escala permanecem os melhores computadores analógicos, permitindo a reprodução de fronteiras complexas; 5) os modelos físicos demonstram visualmente e com

credibilidade, o que acontece e assim, a estimulação intuitiva da percepção fornece uma orientação criativa de soluções de engenharia que um outro modelo não pode facultar.

Por outro lado, Le Méhauté (1990) enumera quatro desvantagens, de modo a refletir, qual o melhor modelo em cada situação específica: 1) efeitos de escala ocorrem em modelos que são mais pequenos que o protótipo, se não for possível a simulação de todas as variáveis relevantes numa correta relação entre cada um; 2) efeitos laboratoriais podem influenciar o processo que está a ser simulado, na medida em que aproximações adequadas do protótipo não são exequíveis; 3) por vezes todas as forças atuantes e as condições fronteira que atuam na natureza não são incluídas no modelo físico por incapacidade, o que torna o resultado incompleto; 4) exceto em casos raros, os modelos físicos são inegavelmente mais dispendiosos de operar do que os modelos numéricos e desta feita, sempre que os modelos numéricos apresentam resultados confiáveis, estes são a ferramenta de escolha.

### **3.2. Fundo fixo e móvel**

Pode-se dividir a modelação física para estudo de processos costeiros em duas classes, correspondentes a modelos de fundo fixo e modelos de fundo móvel. O modelo de fundo fixo tem limites sólidos que não podem ser modificados pelos processos hidrodinâmicos decorrentes do modelo experimental, contudo, as fronteiras podem modificar os processos hidrodinâmicos. Estes modelos são utilizados para o estudo de correntes, ondas ou fenómenos similares em laboratório com condições controladas, bem como para a análise da interação entre estruturas sólidas com as forças hidrodinâmicas, tais como paredões, estacas ou bacias portuárias, podendo ser bidimensional ou tridimensional. Os efeitos de escala associados a este tipo de modelo, são razoavelmente conhecidos, o que permite confiança na interpretação dos resultados obtidos (Hughes, 1993).

O modelo de fundo móvel, como o nome indica, tem um fundo composto de material sedimentar que pode ser transportado pelas forças hidrodinâmicas impostas pelas ondas e correntes, esperançosamente de modo semelhante ao do protótipo, para que os efeitos de escala sejam os menores possíveis. Estes modelos não são tão bem compreendidos como os do modelo de fundo fixo, o que obriga a uma maior e mais cuidada revisão dos resultados obtidos. Exemplos onde se aplicam fundos móveis são observações da evolução do perfil da costa, erosão de dunas, resposta de alimentações artificiais a tempestades, entre outros. Os modelos de fundo móvel são também efetuados em modelos bidimensionais e tridimensionais (Hughes, 1993).

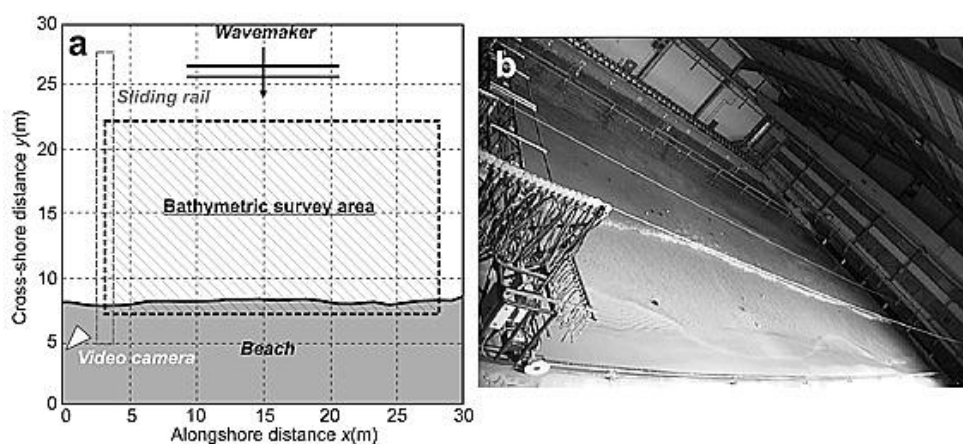
Numa outra esquematização, os modelos de fundo fixo e móvel conseguem ter um compromisso de utilização conjunta, quando ao modelo de fundo fixo se adicionam sedimentos de material de rasto (traçadores) como indicador qualitativo de erosão de sedimentos e áreas de depósito. Por último, qualquer um dos modelos pode ser determinado como modelo de curto ou longo termo (Hughes, 1993).

### 3.3. Exemplos de modelo de fundo móvel e mistos

Os seguintes exemplos de modelos de fundo móvel têm como objetivo demonstrar a possibilidade que este tipo de modelo oferece no estudo de diferentes vertentes da engenharia costeira, proporcionando a replicação em escala mais reduzida dos diversos fenómenos existentes e estruturas utilizadas na prevenção e recuperação de áreas costeiras.

#### 3.3.1. Estudo do transporte sedimentar longitudinal (SOGREAH)

A experiência laboratorial efetuada por Castelle *et al.* (2010), consistiu na comparação do estudo do transporte sedimentar longitudinal em oito tipo de praias naturais de diferentes morfologias. Os autores tentaram reproduzir num modelo de fundo móvel físico, pela ação de correntes induzidas por ondas na recriação da zona de rebentação, com consequências das diferentes características de onda utilizadas na criação de correntes, como por exemplo o ângulo de incidência. A experiência decorreu durante cinco semanas no tanque de ondas SOGREAH (França), tanque este com trinta metros, quer de extensão longitudinal quer, de extensão transversal. O fundo móvel foi composto por sedimentos finos com diâmetro mediano  $d_{50} = 164 \mu\text{m}$  e a sua variação registada por cameras inseridas no fundo de areia com registos de duração entre trinta a sessenta minutos cada (Figura 6).



a) Delimitações da área de pesquisa batimétrica b) Exemplo de imagem vídeo capturada no tanque

Figura 6 - Esquema da experiência laboratorial (retirado de Castelle *et al.*, 2010)

Os resultados obtidos serviram como complemento a modelos numéricos e estudos de campo já efetuados anteriormente, com perspectiva de promover o conhecimento das ações e das suas características destas, no transporte sedimentar longitudinal.

### 3.3.2. Modelação física de uma praia com estrutura de defesa costeira (FEUP)

Este ensaio laboratorial levado a cabo por Guimarães (2014), no tanque de ondas do laboratório de hidráulica da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), teve como objetivo principal identificar a evolução geométrica dos perfis transversais a barlamar (lado ou sentido de onde vêm os sedimentos ou a corrente, em relação a um ponto de referência) de um esporão, de modo a encontrar a forma de um perfil de equilíbrio associado a uma determinada onda. Procedeu-se também à avaliação do comportamento do perfil a diferentes distâncias do esporão, através da modelação física de uma praia sem esporão e a barlamar de um esporão construído em laboratório (Figura 7). A experiência permitiu a comparação dos resultados provenientes do modelo físico com formulações analíticas existentes de projecção de configurações de linha de costa em planta.



a) Modelo físico da praia

b) Batedores hidráulicos geradores de ondas

Figura 7 - Constituição do tanque de ondas ensaiado no laboratório de hidráulica da FEUP (retirado de Guimarães, 2014)

Uma das conclusões principais retiradas deste trabalho foi a identificação de uma geometria de equilíbrio para os perfis transversais analisados, tanto para a praia sem esporão, como para a praia com esporão. No entanto, em todos os ensaios laboratoriais identificou-se a não estabilização de todos os pontos constituintes dos perfis. De realçar que, segundo Guimarães (2014), os efeitos relacionados com os limites físicos do tanque e a geração da ondulação tiveram alguma influência nos resultados finais.

### 3.4. Caracterização do canal de hidráulica

O CH do LabCIVIL é considerado de média dimensão, com um comprimento útil ( $l_u$ ) de 10 m e uma secção transversal ( $l_{canal} \times h_{canal}$ ) de  $0.4 \times 0.5 \text{ m}^2$ , como demonstra a figura 8.

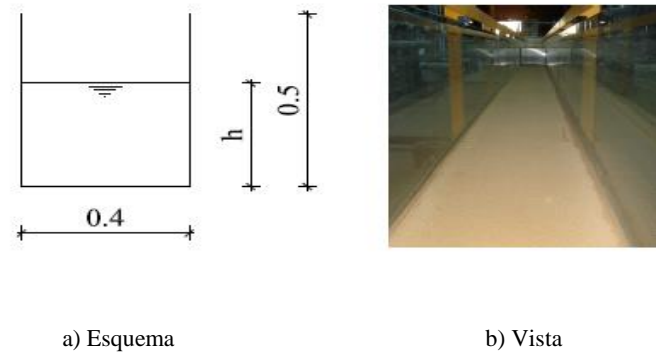


Figura 8 - Secção transversal do canal de hidráulica (retirado de Ribeiro, 2009)

O CH é suportado por dois apoios distanciados de 8 m, sendo um dos apoios fixo e o outro ajustável em altura, o que permite a simulação de diferentes inclinações no CH, entre os limites de  $-0.875 \%$  e  $+2.625 \%$  (Figura 9).

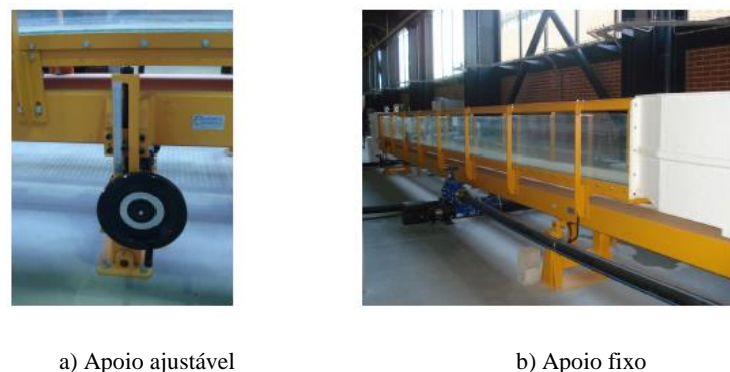


Figura 9 - Pormenor dos apoios para a regulação da inclinação do canal (retirado de Ribeiro, 2009)

O CH é alimentado por um sistema de bombagem em circuito fechado, com cinco reservatórios que têm a capacidade de armazenamento suficiente para que não existam falhas de abastecimento no circuito hidráulico. Sempre que há a necessidade de mudança da água existente no circuito, por razões habitualmente ligadas à sujidade acumulada pela sua utilização, recorre-se à sua substituição pela captação de águas pluviais ou à fonte pública de abastecimento. O sistema de bombagem é composto por uma bomba de capacidade máxima de  $113.50 \text{ m}^3/\text{h}$ , o equivalente a  $31.53 \text{ l/s}$ , que é regulável pelo uso de um estabilizador de caudal automático e/ou através de regulação manual (Figura 10). O caudalímetro permite a visualização digital do valor do caudal em escoamento, com a

precisão de 0.1 l/s, e assim um melhor controlo e regularização dos caudais requeridos para cada ensaio (Figura 10d).



a) Bomba e válvula



b) Bomba



c) Válvula



d) Caudalímetro

Figura 10 - Sistemas de bombagem e regulação de caudais (Fonte própria)

## **Capítulo 4**

---

# **ENSAIO EM CANAL DE HIDRÁULICA**





## 4. Ensaio em canal de hidráulica

Para a estimativa de valores da velocidade do transporte sedimentar longitudinal, procedeu-se à realização de ensaios físicos de fundo móvel no canal de hidráulica (CH) do Laboratório do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro (LabCIVIL).

Neste capítulo apresentam-se as técnicas e procedimentos laboratoriais adaptados, bem como as principais conclusões dos resultados obtidos em testes preliminares de repetibilidade, relacionados com a avaliação de procedimentos e condições das características dos ensaios.

### 4.1. Procedimento experimental

Realizaram-se ensaios com duas formas distintas de colocação dos sedimentos no CH, na tentativa de avaliar os processos de transporte por arrastamento no fundo e em suspensão. No caso do transporte por arrastamento no fundo estes ensaios foram repetidos para duas areias de  $d_{50}$  diferentes, com um volume total de areia  $V_{Ts}$  utilizado de cerca de  $0.07 \text{ m}^3$ . Por sua vez, o cálculo da velocidade dos sedimentos foi suportado pela medição e análise das alturas de sedimentos acumulados ao longo de diversas secções transversais do CH, ao longo do tempo de ensaio.

Os valores da altura de sedimentos registados nos diversos instantes de tempo,  $t$ , foram efetuados pela observação da altura da camada de sedimentos em marcas divisórias colocadas ao longo do CH, espaçadas entre si 25 cm. Assim, os primeiros 6.5 m do CH foram divididos por 27 marcas divisórias (S1 a S27), com a colocação da primeira marca (S1) no começo do CH, em  $l=0 \text{ m}$ , e a última marca (S27) a  $l=6.5 \text{ m}$  (Figura 11).

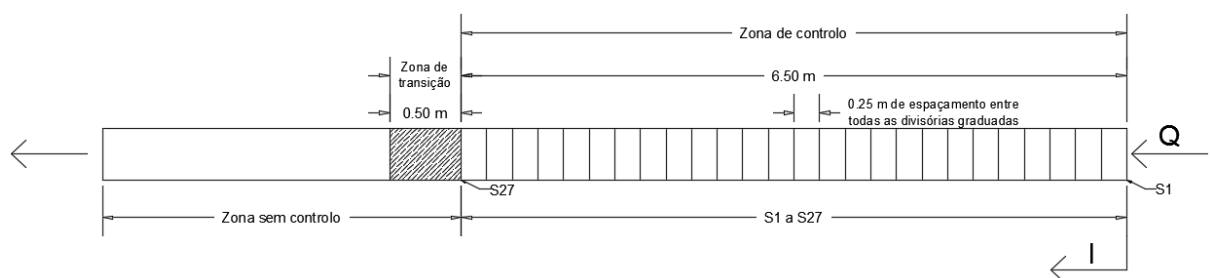


Figura 11 - Esquema em planta do CH, com representação do seccionamento do canal para efeitos de medição

As divisórias correspondem a uma régua vertical de acetato de 6 cm, com graduação ao milímetro, em que o valor de 0 cm coincide com o fundo do CH (Figura 12).



Figura 12 - Marca divisória em régua de acetato

Por simplificação, ao longo de todos os ensaios considerou-se que os registos das 27 alturas dos sedimentos ao longo das diferentes secções foram efetuados exatamente no mesmo instante de tempo.

O ensaio por arrastamento no fundo consistiu inicialmente na colocação de uma camada de 2.5 cm de altura de sedimentos no fundo do CH,  $h_{Si}$ , ao longo de 7 metros de extensão do CH, na zona de controlo, de  $S1$  a  $S27$ , e na zona de transição, a jusante da última secção assinalada ( $S27$ ) (Figura 11 e Figura 13), com o intuito de promover a passagem entre a camada de sedimentos e o escoamento líquido. Foram medidos os valores de altura da camada de sedimentos depositada no fundo do CH,  $h_{t,S(1 \text{ a } 27)}$ , em cada marca divisória (27 secções), em instantes com intervalos de tempo de três minutos,  $\Delta t = 3 \text{ min}$ , ao longo de trinta minutos de ensaio,  $\Delta t_{total} = 30 \text{ min}$ . Durante cada um dos ensaios, as condições de caudal líquido,  $Q_l$ , e inclinação,  $i$ , foram mantidas constantes.



a) Vista de montante

b) Vista de jusante

Figura 13 - Camada de sedimentos no fundo do CH, antes do início dos ensaios,  $h_{Si} = 2.5 \text{ cm}$

Por sua vez, o ensaio por suspensão consistiu na colocação de um silo suspenso a 46 cm do fundo do CH, colocado no alinhamento de  $S1$ , com o volume de sedimentos correspondente ao  $V_{Ts} = 0.07 \text{ m}^3$ . O silo foi libertando a areia ao longo do tempo total de ensaio, 30 minutos, o que fez um caudal de introdução dos sedimentos no canal de  $3.89 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ . O método

de registo do comportamento dos sedimentos ao longo dos ensaios, o tempo total e intervalos de tempos de medição das alturas dos sedimentos utilizados para os ensaios de suspensão foram os mesmos que para os ensaios por arrastamento no fundo (Figura 14).



a) Vista ao longo do CH

b) Vista lateral

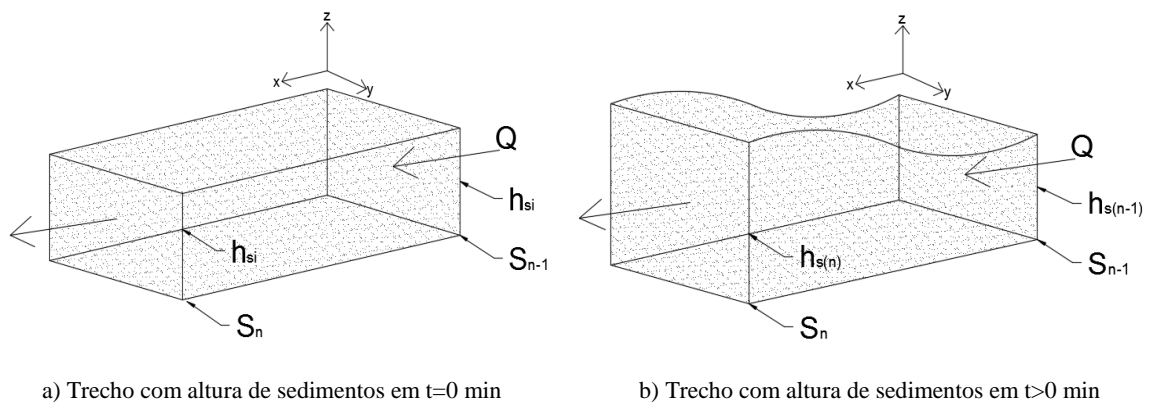
Figura 14 - Silo de colocação de areia no CH, suspenso sobre a secção SI

## 4.2. Metodologia de cálculo da velocidade de transporte sedimentar

Para os dois tipos de ensaio no CH, arrastamento no fundo e suspensão, definiram-se duas metodologias de estimativa da velocidade de transporte sedimentar, que assentam na mesma base de cálculo.

### 4.2.1. Arrastamento no fundo

A figura 15, ilustra esquematicamente um trecho (espaço entre secções consecutivas) genérico da zona de controlo do CH, representativo do posicionamento dos sedimentos em instantes de tempo diferentes. A figura 15a representa o instante de tempo  $t=0$  min, com a camada de sedimentos de fundo inicial, de altura  $h_{si}=2.5$  cm, comum a todos os ensaios de arrastamento no fundo, ao passo que a figura 15b representa um instante de tempo qualquer,  $t>0$  min, de alturas  $h_{t,S(n-1)}$  e  $h_{t,S(n)}$  ( $n=1$  a 27) registadas por observação.



a) Trecho com altura de sedimentos em  $t=0$  min

b) Trecho com altura de sedimentos em  $t>0$  min

Figura 15 - Esquema de trechos de registo de alturas em diferentes instantes de tempo

A evolução das formas de fundo dos sedimentos no CH ao longo do tempo tem como consequência um registo nas secções das alturas que vai oscilando, existindo instantes de tempo em que os valores registados são mais elevados que no momento anterior.

Desta forma, a média aritmética da altura de sedimentos registada nas 27 estações, para cada instante de tempo, permite estimar a taxa média de abaixamento da altura de sedimentos no canal ao longo do tempo de ensaio. Independentemente do transporte sedimentar apresentar um comportamento uniforme ou não ao longo do tempo, utilizou-se a aproximação linear aos registos médios para estimar esta taxa de abaixamento ao longo do tempo, que permitiu mitigar alguns eventuais erros de medição. A Figura 16 ilustra um exemplo concreto desta descrição, onde se verifica que as médias de alturas de sedimentos medidas ao longo das 27 secções nos instantes  $t = 18$  min e  $t = 21$  min foram superiores às médias das alturas obtidas pela aproximação linear nos tempos correspondentes. Neste caso a média de abaixamento no nível de sedimentos no CH registada ao longo deste ensaio foi de 0.0063 cm/min, o que corresponde a um caudal sólido transportado de 163.8 cm<sup>3</sup>/min.

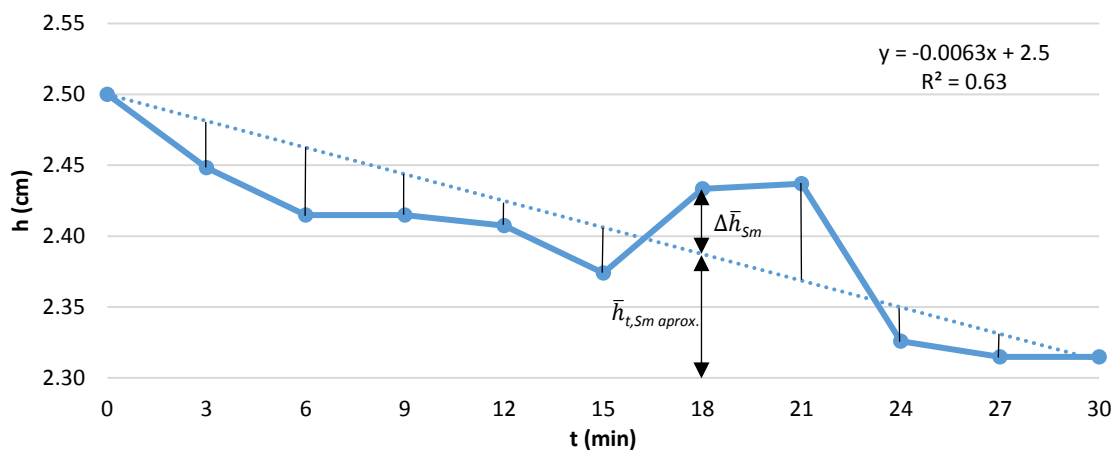


Figura 16 - Aproximação linear à média de alturas de sedimentos nas secções registadas no tempo (aproximação linear a tracejado e valores médios medidos a traço cheio)

Com base na aproximação linear, procedeu-se a uma correção da altura média de todas as secções, em cada instante de tempo,  $\bar{h}_{t,Sm \text{ aprox.}}$ , que por sua vez permite comparar e calcular a diferença da média de alturas entre a aproximação linear e o gráfico das alturas médias medidas, para cada instante de tempo,  $\Delta \bar{h}_{sm}$ . Assim, ao longo das 27 secções do CH e para cada instante de tempo procedeu-se à correção dos valores medidos de  $\Delta \bar{h}_{sm}$ , obtendo-se valores corrigidos de alturas dos sedimentos,  $h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$  em cada secção e instante de tempo.

Conhecendo as alturas de sedimentos ao longo do tempo é possível a obtenção dos volumes de sedimentos passados acumulados no tempo, em cada secção,  $V_{t,S(n)}$ . Naturalmente o volume passado acumulado calculado para uma qualquer secção nunca poderá ser menor que o passado acumulado nessa mesma secção num instante de tempo anterior,  $V_{t-I,S(n)}$ .

O caudal sólido,  $q_{t,S(n)}$ , foi estimado através do volume de sedimentos que cruza a mesma secção num intervalo de tempo,  $V_{\Delta t,S(n)}$ . Por fim, a velocidade de transporte dos sedimentos,  $U_{t,S(n)}$ , foi calculada com base na equação 09.

$$U = Q/A \quad (09)$$

$Q$  corresponde ao caudal sólido e  $A$  à área de secção transversal de sedimentos. Para a estimativa desta área foram definidos vários cenários, que se diferenciam pela forma de quantificar a altura de areia na secção:  $h_{Si}$  (altura da camada de sedimentos inicial),  $h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$  (altura da camada de sedimentos corrigida),  $h_{s.esco.} - h_{Si}$  (altura do escoamento líquido em ensaio retirando a altura da camada de sedimentos inicial),  $h_{s.esco.} - h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$  (altura do escoamento líquido em ensaio retirando a altura da camada de sedimentos corrigida). Utilizou-se também uma das previsões de configuração de fundo proposta por Van Rijn (1984), em que  $a$  é a altura de referência de transporte sedimentar na camada de fundo,  $\Delta$  é a altura de sedimentos da forma de fundo e  $h$  a altura do escoamento líquido (equações 10 e 11).

$$a = 0.5\Delta \quad (10)$$

$$\text{com } a \geq 0.01h \quad (11)$$

Adaptando as expressões anteriores aos ensaios efetuados, estas resultaram em  $h_{Si} \times 0.5$  (equação 10 em que  $\Delta$  é a altura da camada de sedimentos inicial),  $h_{t,S(n) \text{ aprox.}} \times 0.5$  (equação 10 em que  $\Delta$  é a altura da camada de sedimentos corrigida) e  $h_{esco.} \times 0.01$  (equação 11 em que  $h$  é a altura do escoamento líquido).

Por se considerar mais representativo do comportamento observado no CH, a velocidade estimada refere-se a uma média no tempo total de ensaio, obtida para as características registadas entre as secções S22 e S27. Este trecho foi escolhido para caracterizar as velocidades, porque é considerado um intervalo onde não existe qualquer interferência associada à escassez de sedimentos disponíveis a montante ou de turbulência do escoamento, originada pela entrada da água no canal, fazendo deste trecho um bom indicador.

#### 4.2.2. Suspensão

O cálculo da velocidade de transporte sedimentar nos ensaios em suspensão, seguiu a mesma base utilizada para os ensaios de arrastamento no fundo. Contudo, existiram pequenas diferenças, de modo a promover uma melhor análise dos ensaios em suspensão. As alterações relacionaram-se com o facto de nos ensaios em suspensão, o volume de areia disponível para as medições das alturas foi sempre o libertado no silo, nos intervalos de 3 minutos entre medições, sendo isso considerado no cálculo do volume passado acumulado. Foi também alterado o trecho considerado mais representativo para o cálculo médio da velocidade de transporte sedimentar, sendo nestes ensaios considerando o trecho do CH entre as secções *S15* e *S20*, por via das características dos ensaios.

#### 4.3. Descrição dos elementos de ensaios

Na definição dos ensaios consideraram-se diversas variáveis: dimensão dos sedimentos das areias, forma de colocação dos sedimentos no CH, caudal líquido escoado e inclinação do CH (de modo a obter diferentes velocidades de escoamento).

A escolha de sedimentos para utilização nos diversos ensaios, incidiu sobre duas areias de diferentes dimensões, de distintos locais de recolha, armazenadas no LabCIVIL. As areias são provenientes da região de Ílhavo (Vale de Ílhavo) e da região de Vagos (Salgueiro), respetivamente descritas como *d1* e *d2*. A granulometria da areia *d1* e *d2* encontra-se descrita na figura 17, de acordo com a norma NP EN 933-1 (IPQ, 2000).

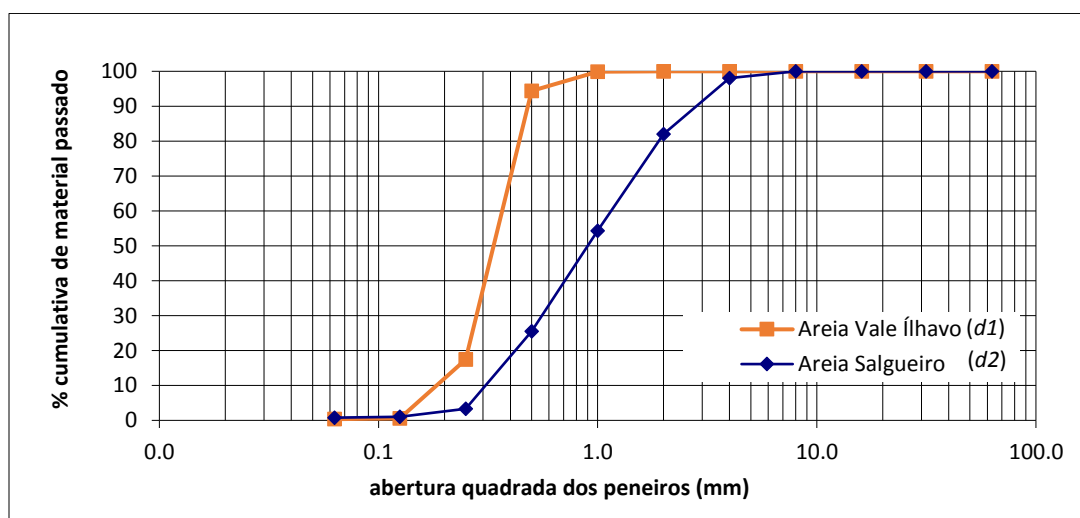


Figura 17 - Curvas granulométricas dos dois tipos de areias utilizados nos ensaios

O  $d_{50}$  estimado para cada areia, correspondente aos valores da abertura dos peneiros em milímetros para 50% de material passado foi de:  $d1_{50}=0.36$  mm e  $d2_{50}=0.83$  mm. Para além

do  $d_{50}$ , utilizaram-se outros valores de percentagem de material passado para efeitos de análise dos caudais sólidos, de acordo com a folha de cálculo de Português (2008), que se apresentam na tabela 2.

Tabela 2 - Valores de diâmetros efetivos para as duas areias

	$d_{15.9}$ (mm)	$d_{35}$ (mm)	$d_{75}$ (mm)	$d_{84.1}$ (mm)	$d_{90}$ (mm)
<b>d1</b>	0.24	0.31	0.44	0.47	0.49
<b>d2</b>	0.37	0.59	1.57	1.94	2.68

Como já referido, os sedimentos foram colocados no CH de duas maneiras distintas, correspondendo a uma colocação prévia no fundo, ou à colocação por suspensão num silo apoiado no CH, posicionado no alinhamento de *SI*, libertados de uma altura de 46 cm, designado apenas como ensaios de suspensão.

Os caudais líquidos de escoamento utilizados nos ensaios foram de 3, 5 e 7 l/s, que passam a ter a denominação de *Q3*, *Q5* e *Q7*, respetivamente. Quanto às inclinações do CH, foram utilizados 0.5 e 1 %, que se denominam por *i0.5* e *i1* também respetivamente, permitindo assim a combinação de diferentes velocidades de escoamento de acordo com as inclinações do CH.

As características dos ensaios simulados no CH estão discriminadas na tabela 3.

Tabela 3 - Características de ensaios executados

	Código	Areia ( <i>d1</i> e <i>d2</i> )	Caudal ( <i>Q<sub>i</sub></i> ) (l/s)	Inclinação ( <i>i</i> ) (%)	Posição da areia ( <i>F/S</i> )
<b>E01</b>	<b>ERd1Q3i0.5F</b>	<b>d1</b>	<b>3</b>	<b>0.5</b>	<b>Fundo</b>
<b>E02</b>	<b>ERd1Q3i1F</b>			<b>1</b>	
<b>E03</b>	<b>ERd1Q5i0.5F</b>		<b>5</b>	<b>0.5</b>	
<b>E04</b>	<b>ERd1Q5i1F</b>			<b>1</b>	
<b>E05</b>	<b>ERd1Q7i0.5F</b>		<b>7</b>	<b>0.5</b>	
<b>E06</b>	<b>ERd1Q7i1F</b>			<b>1</b>	
<b>E07</b>	<b>ERd1Q3i0.5S</b>		<b>3</b>	<b>0.5</b>	<b>Suspensão</b>
<b>E08</b>	<b>ERd1Q3i1S</b>			<b>1</b>	
<b>E09</b>	<b>ERd1Q5i0.5S</b>		<b>5</b>	<b>0.5</b>	
<b>E10</b>	<b>ERd1Q5i1S</b>			<b>1</b>	
<b>E11</b>	<b>ERd1Q7i0.5S</b>		<b>7</b>	<b>0.5</b>	
<b>E12</b>	<b>ERd1Q7i1S</b>			<b>1</b>	
<b>E13</b>	<b>ERd2Q3i0.5F</b>	<b>d2</b>	<b>3</b>	<b>0.5</b>	<b>Fundo</b>
<b>E14</b>	<b>ERd2Q3i1F</b>			<b>1</b>	
<b>E15</b>	<b>ERd2Q5i0.5F</b>		<b>5</b>	<b>0.5</b>	
<b>E16</b>	<b>ERd2Q5i1F</b>			<b>1</b>	
<b>E17</b>	<b>ERd2Q7i0.5F</b>		<b>7</b>	<b>0.5</b>	
<b>E18</b>	<b>ERd2Q7i1F</b>			<b>1</b>	

Tendo em conta as características previstas para os ensaios, procedeu-se ao cálculo dos valores da altura do escoamento líquido,  $h_{esco.}$ , que resultam da equação de Manning-Strickler (equação 12), em escoamento de superfície livre (Tabela 4).

$$Q_l = K_s S R_h^{2/3} i^{1/2} \quad (12)$$

O coeficiente de rugosidade utilizado foi  $K_s = 105 \text{ m}^{1/3}\text{s}^{-1}$ , como indicado nos trabalhos de Silva & Ascensão (2008) e Ribeiro (2009), para o CH do LabCivil, valor representativo de um escoamento num canal em vidro.

Na tabela 4 são ainda apresentados os valores teóricos da velocidade do escoamento líquido correspondentes aos valores de altura de escoamento de cada ensaio.

Tabela 4 - Valores teóricos da altura de escoamento,  $h_{esco.}$  e da velocidade de escoamento,  $U_{esco.l. \text{ teórico}}$

$Q_l$ (l/s)	$i$ (%)	$h_{esco.}$ (cm)	$U_{esco.l. \text{ teórico}}$ (m/s)
3	0.5	1.6	0.47
	1	1.3	0.58
5	0.5	2.3	0.54
	1	1.8	0.69
7	0.5	2.8	0.63
	1	2.2	0.80

#### 4.4. Testes de repetibilidade

A repetição de ensaios serviu para avaliar a respetiva exequibilidade, bem como a fiabilidade dos resultados da metodologia proposta. Todos os testes de repetibilidade foram realizados para arrastamento no fundo, servindo também como modelo base para todos os ensaios em suspensão. Apesar de não se terem repetido ensaios em suspensão, foram feitos testes para o caudal sólido libertado pelo silo. Deste modo foi conseguido um controlo do ensaio, mantendo um caudal sólido médio libertado de  $2333.33 \text{ cm}^3/\text{min}$ , que ao fim dos 30 min de ensaio corresponde ao volume total de  $0.07 \text{ m}^3$  de sedimentos, usado também nos testes de arrastamento no fundo.

Após uma análise prévia, consideraram-se quatro cenários de testes, repetindo-se duas vezes cada cenário, conjugando dois caudais ( $Q_3$  e  $Q_7$ ) com duas inclinações ( $i_{0.5}$  e  $i_1$ ) para  $dI$  (Tabela 5). Cada cenário foi realizado duas vezes, o que fez um total de oito testes. Estes testes correspondem a situações extremas (mínimos e máximos) de velocidade de escoamento líquido.



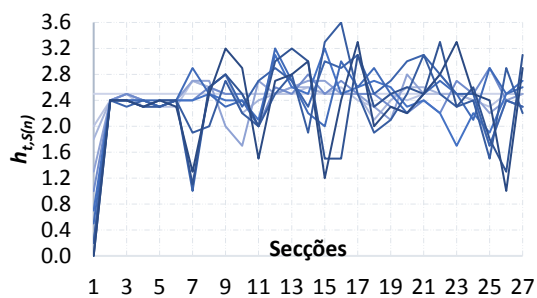
Tabela 5 - Testes de repetibilidade executados

	Código	$d_{areia}$	Caudal ( $Q_i$ )	Inclinação ( $i$ )	Posição da areia ( $F/S$ )
<b><i>T1 e T2</i></b>	<b><i>TRD1Q3i0.5F (1 e 2)</i></b>	<b>D1</b>	<b>3</b>	<b>0.5</b>	<b>Fundo</b>
<b><i>T3 e T4</i></b>	<b><i>TRD1Q3i1F (1 e 2)</i></b>			<b>1</b>	
<b><i>T5 e T6</i></b>	<b><i>TRD1Q7i0.5F (1 e 2)</i></b>		<b>7</b>	<b>0.5</b>	
<b><i>T7 e T8</i></b>	<b><i>TRD1Q7i1F (1 e 2)</i></b>			<b>1</b>	

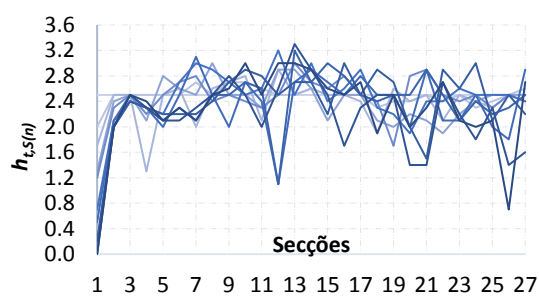
Durante o acompanhamento dos testes foram identificados comportamentos comuns a todos os testes. Em todos os ensaios verificou-se que a forma de superfície livre do escoamento apresentava pequenas oscilações. O movimento dos sedimentos nunca provocou escassez, ou falta de sedimentos na zona monitorizada (superfície do fundo do canal visível e sem areia), suficiente para inviabilizar a estimativa da velocidade dos sedimentos transportados. No entanto, verificaram-se comportamentos distintos entre testes de diferentes condições, tendo os comportamentos sido similares para os testes com as mesmas condições (testes repetidos).

Em termos visuais, apesar do fundo do CH ficar pontualmente visível, verificou-se que para *T1* e *T2* os sedimentos nunca se esgotaram a montante de *S2* (entre a secção *S1* e *S2*) e o fundo do CH nunca ficou visível a jusante de *S2*. Nos testes *T3* e *T4* os sedimentos nunca escassearam a montante de *S3* (entre *S2* e *S3*) e o fundo do CH nunca ficou visível a jusante de *S5*. Já em *T5* e *T6* os sedimentos nunca esgotaram a montante de *S3* (entre *S2* e *S3*) e o fundo do CH nunca ficou visível a jusante de *S7*. Por último, em *T7* e *T8* os sedimentos nunca se esgotaram a montante de *S14* (entre *S13* e *S14*) e o fundo nunca ficou visível a jusante de *S14*. O comportamento verificado é explicado pelo aumento de caudal e inclinação entre testes. Para caudais e inclinações maiores a escassez de sedimentos aconteceu em secções mais a jusante. As alturas de sedimentos nas secções *S1* a *S27*, registadas ao longo dos testes *T1* a *T8*,  $h_{t,S(n)}$ , durante o tempo total de 30 minutos do ensaio ( $\Delta t_{total}$ ), em intervalos de tempo de três minutos ( $\Delta t$ ), representando 11 séries de registos no tempo, são apresentadas na figura 18.

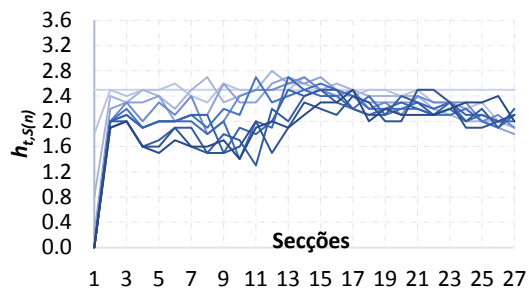
A primeira verificação retirada dos testes repetidos com as mesmas condições, foi de que os perfis da camada de sedimentos no fundo obtidos ao longo do tempo foram semelhantes entre testes, não havendo nenhuma discrepância significativa de valores.



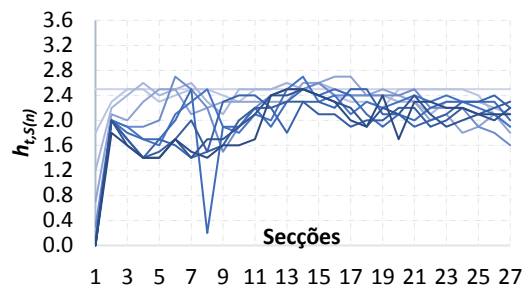
a) T1 ( $Q= 3 \text{ l/s}$ ;  $i= 0.5 \%$ )



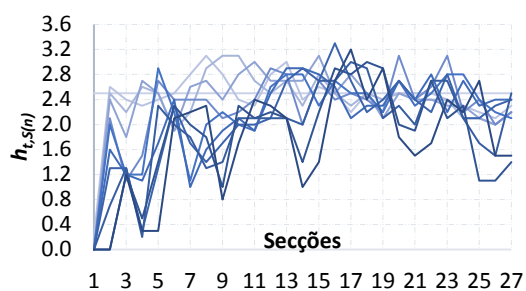
b) T2 ( $Q= 3 \text{ l/s}$ ;  $i= 0.5 \%$ )



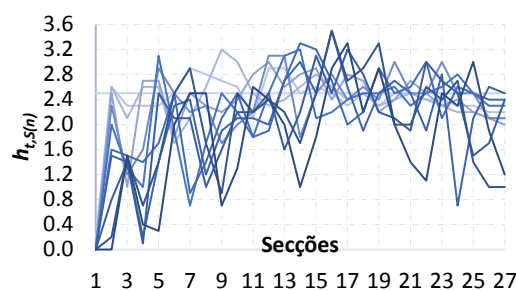
c) T3 ( $Q= 3 \text{ l/s}$ ;  $i= 1 \%$ )



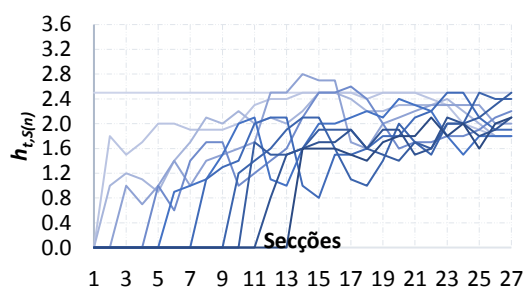
d) T4 ( $Q= 3 \text{ l/s}$ ;  $i= 1 \%$ )



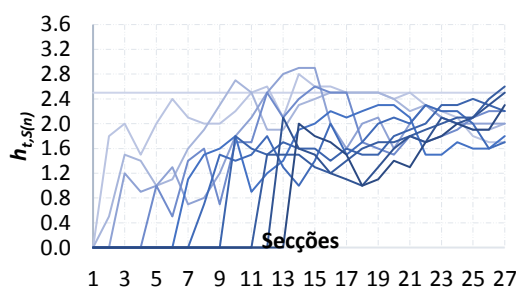
e) T5 ( $Q= 7 \text{ l/s}$ ;  $i= 0.5 \%$ )



f) T6 ( $Q= 7 \text{ l/s}$ ;  $i= 0.5 \%$ )



g) T7 ( $Q= 7 \text{ l/s}$ ;  $i= 1 \%$ )



h) T8 ( $Q= 7 \text{ l/s}$ ;  $i= 1 \%$ )

Figura 18 - Alturas registadas,  $h_{t,S(n)}$ , da camada no fundo do CH nas secções em diferentes instantes (cor mais clara para  $t= 0 \text{ min}$  e cor mais escura para  $t= 30 \text{ min}$ ) de tempo para os testes T1 a T8

Assim, na sequência do aumento do caudal e inclinação do canal, nota-se uma distribuição dos sedimentos para jusante, correspondente à diminuição da altura da camada de sedimentos ao longo do tempo (mais perceptível para T7 e T8, nas Figuras 18g e 18h). Por

outro lado, os testes *T1* e *T2*, são os que demonstram uma distribuição de sedimentos mais confusa, em que as linhas representativas da camada de sedimentos para diferentes tempos se confundem. Deste modo verificou-se que a aumento do caudal e/ou da inclinação está associado a uma distribuição de sedimentos mais perceptível, com linhas de perfis da camada de sedimentos depositadas menos sobrepostas e mais deslocadas para jusante. Este comportamento está relacionado com a velocidade de escoamento, pois o maior caudal e inclinação provocam um maior valor da velocidade de escoamento e por conseguinte um maior arrastamento dos sedimentos. Como referido, este comportamento é mais notório na comparação entre testes de caudal e inclinação de valores máximos (*T7* e *T8*), do que com testes de caudal e inclinação de valores mínimos (*T1* e *T2*).

Na tabela 6 são apresentados os volumes acumulados que passaram a secção *S27* no fim dos testes,  $V_{t,S27}$ , bem como o abaixamento médio da camada de sedimentos existentes no CH.

Tabela 6 – Volumes acumulados passados em *S27*, registados no fim de cada teste de repetibilidade,  $V_{t,S27}$ , e abaixamento médio da camada de sedimentos,  $h_{abaixa.}$ , para cada teste correspondente

	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>	<i>T4</i>	<i>T5</i>	<i>T6</i>	<i>T7</i>	<i>T8</i>
$V_{t,S27}$ (cm <sup>3</sup> )	6841	9137	16820	17668	17551	15724	44462	45851
$h_{abaixa.}$ (cm/min)	0.0063	0.0081	0.0228	0.0238	0.0237	0.0216	0.0604	0.0621

As diferenças entre volumes de testes repetidos foram de 2296 cm<sup>3</sup>, 848 cm<sup>3</sup>, 1827cm e 1388 cm<sup>3</sup>, respetivamente entre *T1/T2*, *T3/T4*, *T5/T6* e *T7/T8*, o que contabilizou uma percentagem em relação ao volume total de sedimentos utilizados nos testes,  $V_{Ts}$ , de 3.53 % para *T1/T2*, sendo o *T2* 33.56 % maior que *T1*, 1.31 % para *T3/T4*, sendo o *T4* 5.04 % maior que *T3*, 2.81 % para *T5/T6*, sendo *T5* 11.62 % maior que *T6* e 2.14 % para *T7/T8*, com *T8* 3.12 % maior que *T7*. Desta forma constata-se uma incerteza elevada nos resultados de menor inclinação (*T1/T2* e *T5/T6*), que descem para a ordem dos 5 % ou menos nos outros testes.

Os volumes apresentados não correspondem à taxa de abaixamento médio da camada de fundo, isto porque no método de cálculo utilizado, recorreu-se a uma função condicional para obter os volumes acumulados, que por via dos erros de medição intrínsecos aos valores da altura da camada de sedimentos no fundo que levavam em alguns dos casos os sedimentos a percorrerem o sentido contrário ao do escoamento líquido, resultando em volumes acumulados menores que os registados no instante anterior, fez com que resultados dos volumes tivessem variação em relação ao esperado pela taxa de abaixamento.

A média de abaixamento da altura de sedimentos,  $h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$ , de cada par de testes repetidos em todas as secções ao longo do tempo total dos ensaios foram de 2.38 cm, 2.12 cm, 2.13 cm e 1.51 cm, com uma diferença de alturas média respetivamente de 0.31 cm, 0.21 cm, 0.17 cm e 0.20 cm. Estes valores resultaram numa percentagem de diferença de alturas em relação à média obtida em cada par repetido de 12.82 %, 9.77 %, 8.03 % e 13.23 %. Já nas máximas diferenças de alturas, registadas em  $h_{18,S12}= 2.02$  cm,  $h_{18,S8}= 1.56$  cm,  $h_{21,S24}= 1.34$  cm e  $h_{24,S11}= 1.61$  cm, as percentagens do valor também em relação às médias obtidas foram de 84.73%, 73.84 %, 63.23 % e 106.90 %, respetivamente entre  $T1/T2$ ,  $T3/T4$ ,  $T5/T6$  e  $T7/T8$ . Com isto verificou-se que é entre os testes  $T1$  e  $T2$  que se obteve a maior diferença entre alturas da camada de sedimentos obtidos pela aproximação linear, o que está associado à maior incerteza provocada pelas características do teste, com caudal de 3 l/s e inclinação de 0.5 %, que originam menor movimento de sedimentos e correspondentemente um maior impacto associado à incerteza de medição da camada de fundo. As máximas diferenças de altura entre testes ocorrem a partir do 4/5 do tempo total de ensaio, mais propriamente ao minuto 18, mas também no minuto 21 e 24. A maior diferença de alturas em relação à média foi verificada para  $T7/T8$ , o que poderá ser explicado pelo maior caudal sólido e velocidade de transporte dos sedimentos nestes testes, originado pela maior caudal escoado associado à maior inclinação, que provocaram formas de fundo com acumulação de sedimentos com forma ondular, aumentando a probabilidade de registo de alturas da camada de fundo mais elevadas em determinados instantes ao longo dos testes.

Pelo tratamento analítico, as velocidades médias encontradas ao longo dos 30 minutos de teste, entre  $S22$  e  $S27$ ,  $U_{30,S(22 \text{ a } 27)}$ , apresentam-se na tabela 7, considerando as diferentes formas de estimar a altura da secção do fluxo sedimentar.

Tabela 7 - Velocidades médias ao longo do tempo de teste, entre  $S22$  e  $S27$ ,  $U_{30,S(22 \text{ a } 27)}$  em  $T1$  a  $T8$  para diferentes alturas consideradas na área da secção transversal do fluxo sedimentar

	$U_{30,S(22 \text{ a } 27)} (\times 10^{-3} \text{ m/s})$						
	$h_{Si}$	$h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$	$h_{esco.}$	$(h_{esco.}+h_{Si})-h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$	$h_{Si} \times 0.5$	$h_{t,S(n) \text{ aprox.}} \times 0.5$	$h_{esco.} \times 0.01$
<b>T1</b>	0.34	0.36	0.52	0.57	0.67	0.72	52.43
<b>T2</b>	0.40	0.48	0.63	0.58	0.81	0.96	63.15
<b>T3</b>	0.89	1.05	1.71	1.34	1.78	2.10	138.72
<b>T4</b>	0.92	1.05	1.76	1.44	1.83	2.11	143.10
<b>T5</b>	0.91	1.05	1.43	1.29	1.83	2.09	142.73
<b>T6</b>	0.84	0.99	1.31	1.24	1.67	1.98	130.53
<b>T7</b>	2.36	2.79	2.68	2.36	4.71	5.58	368.24
<b>T8</b>	2.44	2.91	2.77	2.40	4.88	5.81	381.45

De uma forma geral, a velocidade dos sedimentos aumentou com o aumento do caudal escoado e da inclinação do CH.

A percentagem de aproximação de valores médios da velocidade de transporte dos sedimentos obtidos na tabela 7, pela mesma ordem de apresentação, entre os testes com as mesmas condições de ensaio  $T1/T2$  foi de 85.00 %, 75.00 %, 82.54 %, 98.27 %, 82.72 %, 75.00 % e 83.02 %, já para  $T3/T4$  foram 96.74 %, 100.00 %, 97.16 %, 93.06 %, 97.27 %, 99.53 % e 96.94 %, nos testes  $T5/T6$ , os resultados foram 92.31 %, 94.29 %, 91.61 %, 96.12 %, 91.26 %, 94.74 % e 91.45 % e por último, para  $T7/T8$ , foram 96.72 %, 95.88 %, 96.75 %, 98.33 %, 96.52 %, 96.04 % e 96.54 %. As percentagens permanecerem na mesma ordem de grandeza, sendo que o maior valor obtido em percentagem foi sempre para altura considerada de  $(h_{esco.}+h_{Si})-h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$ . Como exceção apenas os testes  $T3/T4$ , em que o maior valor verificado foi para  $h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$ , de 100.00 %, ou seja, valor igual para os dois testes ( $1.05 \times 10^{-3}$  m/s).

Os resultados dos testes de repetibilidade mostraram que a estimativa da velocidade de transporte de sedimentos foi mais parecida na escolha de  $(h_{esco.}+h_{Si})-h_{t,S(n) \text{ aprox.}}$  como altura da secção transversal, que desta forma será a apresentada e analisada no capítulo seguinte. Decidiu-se manter como ensaios de registo os primeiros testes de repetibilidade realizados de cada par de testes, ou seja,  $T1$ ,  $T3$ ,  $T5$  e  $T7$ , que na fase seguinte deste trabalho são denominados respetivamente como  $E01$ ,  $E02$ ,  $E05$  e  $E06$ .

Assim, considera-se que os resultados dos testes de repetibilidade no seu conjunto, formaram uma base de suporte interpretativa que permitiu o avanço para os restantes ensaios.



## Capítulo 5

---

# RESULTADOS





## 5. Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios através das alturas de areia medidas no decorrer de cada teste e na correção com base na aproximação linear das medições, com vista à obtenção das velocidades de transporte sedimentar. Estes resultados são posteriormente analisados e discutidos no capítulo 6.

### 5.1. Ensaios por arrastamento no fundo

Os resultados das alturas da camada de sedimentos no fundo do CH registradas em cada secção ao longo do tempo, para os ensaios *E01* a *E06*, de areia *d1*, são apresentados na figura 19.

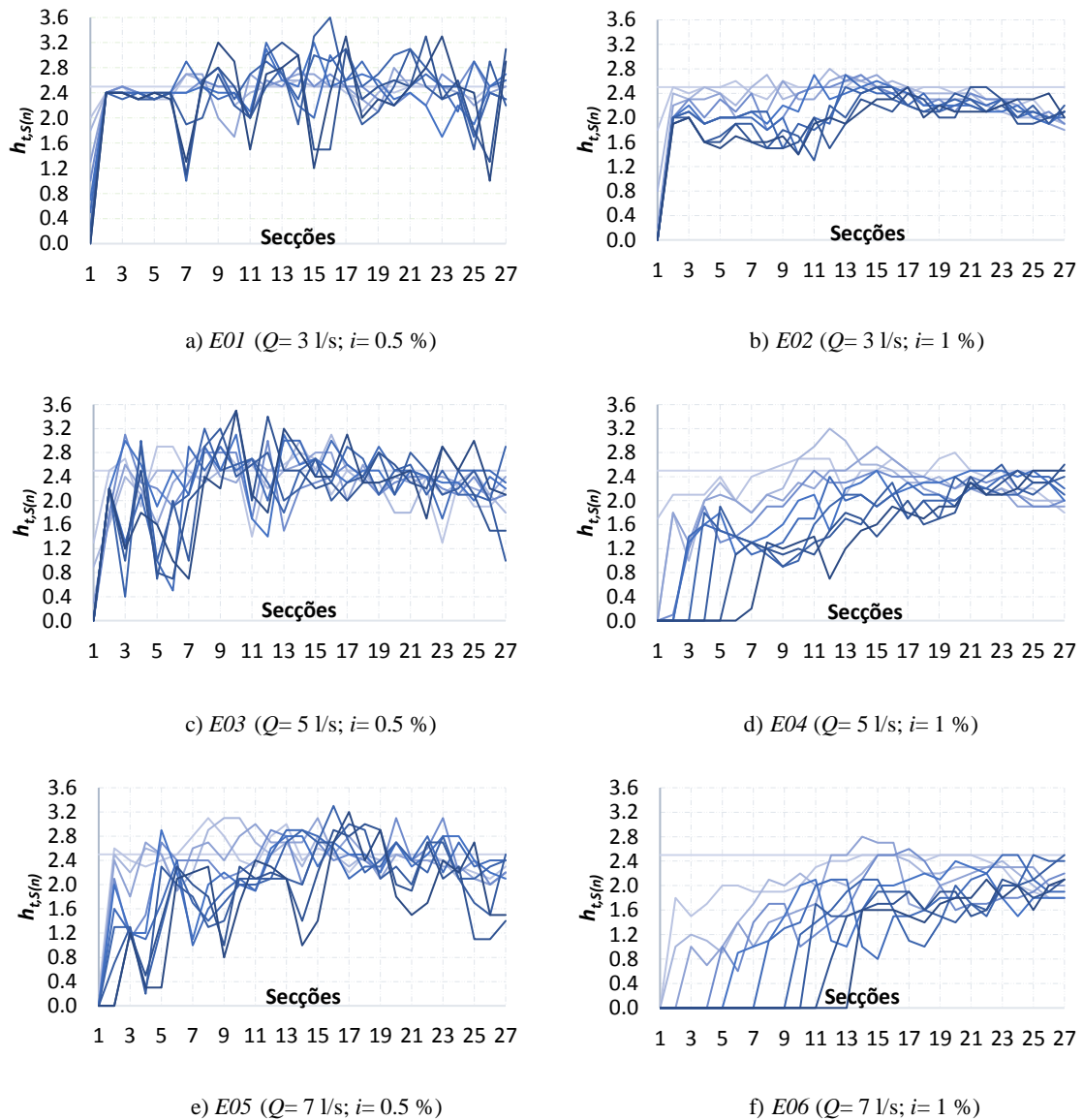


Figura 19 - Alturas registadas,  $h_{t,s(n)}$ , da camada de sedimentos no fundo do CH, nas secções e nos diferentes instantes de tempo, para *E01* a *E06* (cores claras para os instantes iniciais e cores escuras para os instantes finais do ensaio)

Sobretudo entre *E03/E04* e *E05/E06*, é verificável pela gradação de cor, que sempre que o caudal e/ou a inclinação é maior, é mais perceptível a distribuição sedimentar para os trechos a jusante, fazendo com que haja deficiência sedimentar nos trechos a montante. Em *E04* e *E06* verificou-se a falta de sedimentos nas secções a montante, visível nos valores de 0 cm de altura registados até às secções *S6* e *S13*, respetivamente. No ensaio *E06* a falta de sedimentos nas secções de montante começou mais cedo e prolongou-se mais no tempo, devido ao caudal utilizado mais elevado. Também para *E05* existiu o esgotamento de sedimentos na zona de montante, contudo numa fase final do ensaio ( $t= 30$  min) e com pouca extensão em comprimento (até *S3*), tendo assim pouca influência nas alturas registadas para secções a jusante.

De seguida apresentam-se as retas de aproximação às alturas médias medidas ao longo dos ensaios *E01* a *E06* (Figura 20).

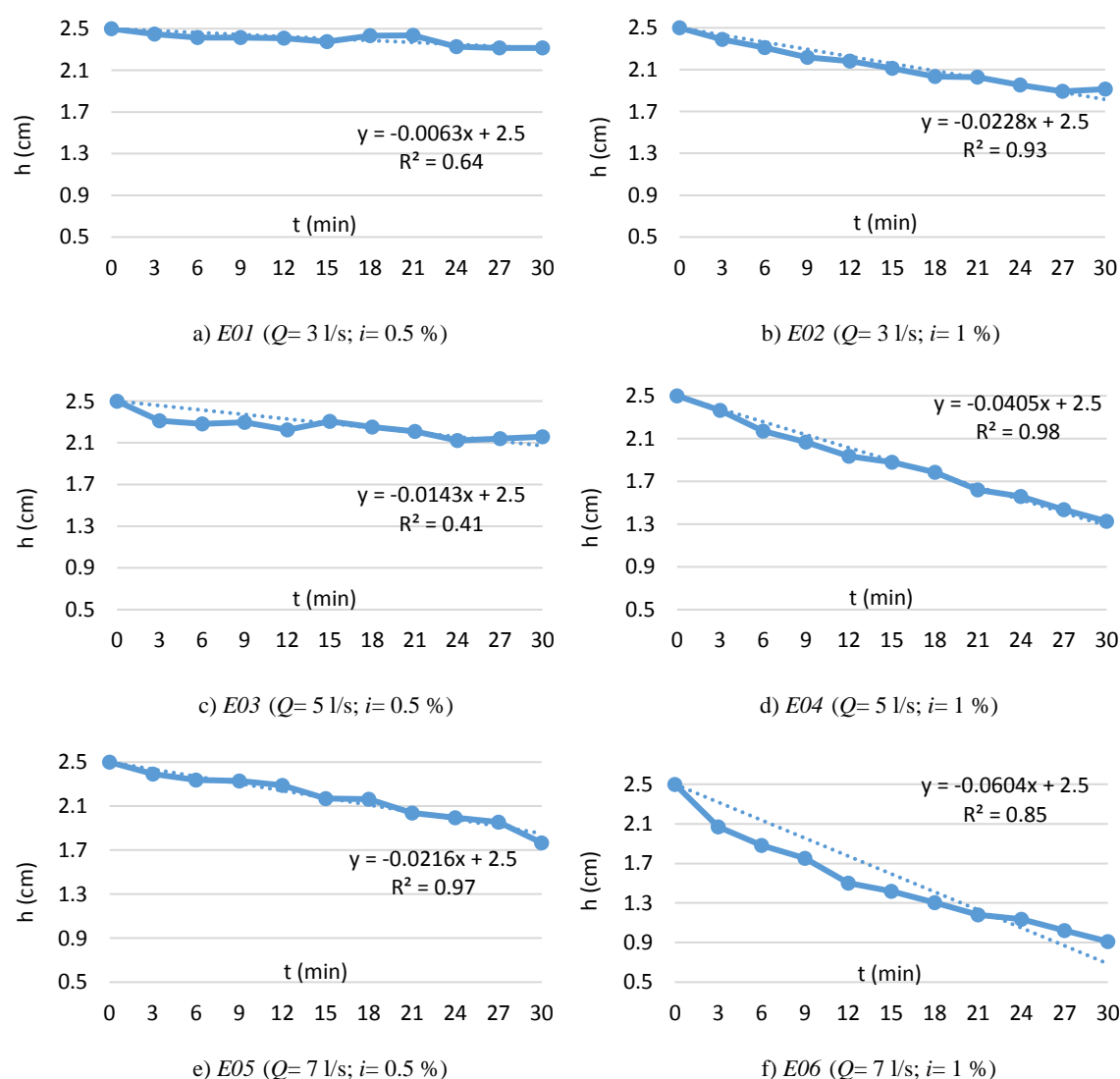


Figura 20 - Alturas medidas (traço cheio) e aproximação linear (tracejado) nos ensaios *E01* a *E06*

Numa primeira análise, verificou-se que os ensaios realizados com inclinação de 1 % sugerem resultados mais coerentes em relação aos ensaios realizados com inclinação de 0.5 %, isto porque o coeficiente de correlação é para *E02* e *E04*, acima dos 90% e para *E06* de 84.45 %. Estes valores relacionam-se com o facto das medições das alturas registadas serem mais constantes tanto ao longo do canal, como ao longo do tempo, o que permitiu que as alturas medidas se aproximassem mais das retas de aproximação. Ainda assim, de referir que apesar do ensaio *E05* ter inclinação de 0.5 %, tem um valor de correlação elevado (97 %), isto devido ao caudal mais elevado utilizado neste ensaio (7 l/s).

As velocidades médias dos sedimentos, obtidas nos ensaios *E01* a *E06*, com utilização da altura  $(h_{esco.} + h_{Si}) - h_{t,S(n)aprox.}$  para a área da secção transversal encontram-se na figura 21.

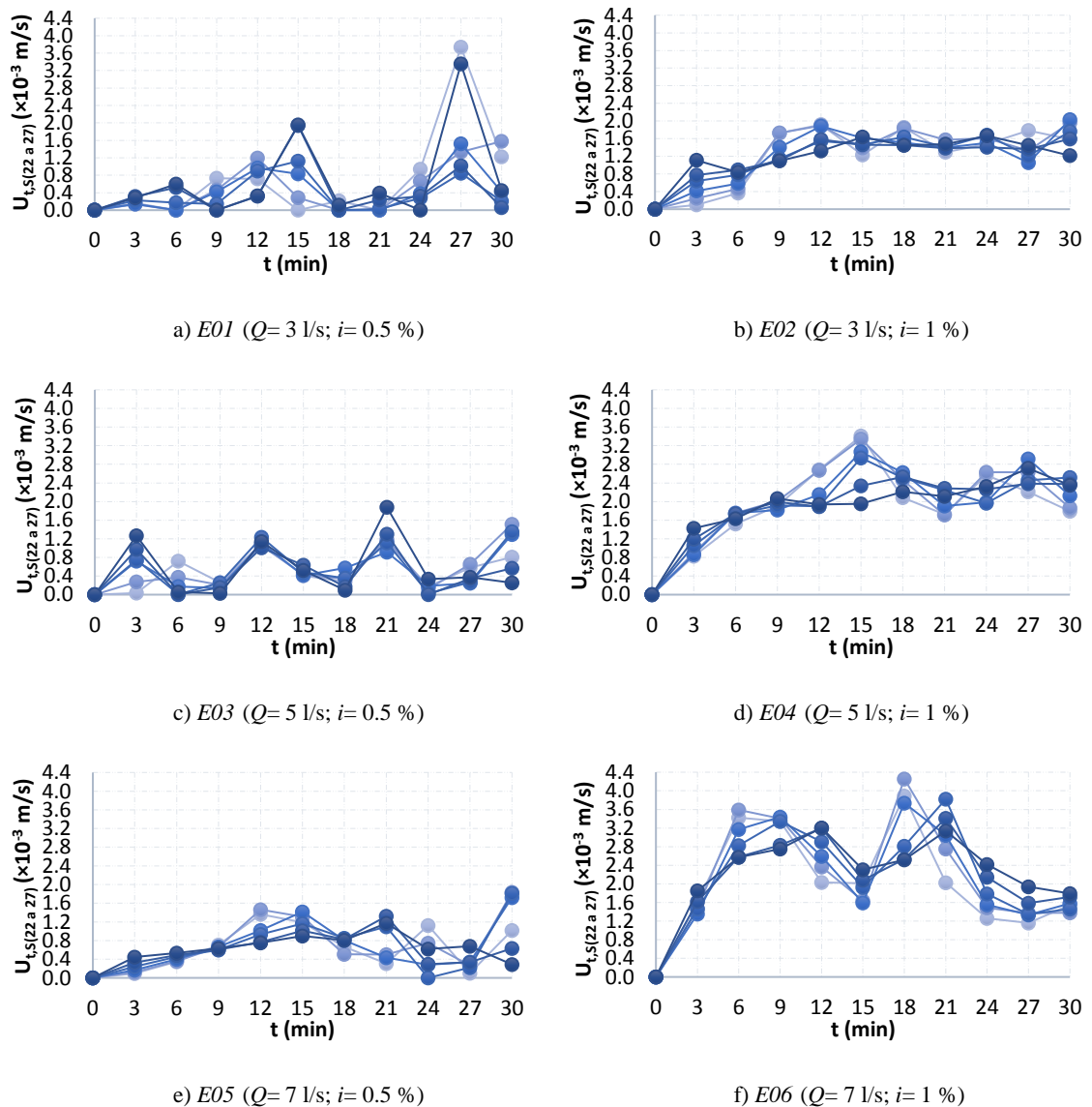


Figura 21 - Velocidade de transporte dos sedimentos em intervalos de tempo de 3 minutos, ao longo dos ensaios *E01* a *E06*, para as secções S22 (claro) a S27 (escuro)

Velocidades dos sedimentos associadas aos ensaios com inclinação de 1 % (*E02*, *E04* e *E06*) são menos dispersas em comparação com os ensaios de 0.5 % (*E01*, *E03* e *E05*).

Em *E01*, a dispersão é maior para  $t = 15$  e 27 min, enquanto que em *E03* a maior dispersão ocorreu nos minutos 3, 12, 21 e 30, e no ensaio *E05* nos minutos 21 e 30. Nos ensaios de inclinação de 1 %, também existiram picos de velocidade, contudo menos pronunciados e em menor quantidade. Ainda assim, poder-se-á destacar os picos de velocidade em *E04*, no instante  $t = 15$  min e em *E06* aos minutos 18 e 21.

Esta oscilação do valor da velocidade ao longo dos ensaios revela a dependência dos resultados na posição dos sedimentos e na estimativa dos volumes transportados. Por isso, foram calculadas as velocidades médias dos sedimentos no tempo e na extensão do trecho entre *S22* a *S27* de cada ensaio. A tabela 8 apresenta os valores de *E01* a *E06*.

Tabela 8 – Velocidades médias entre as secções *S22* e *S27*, para os ensaios de *E01* a *E06*

	<i>E01</i>	<i>E02</i>	<i>E03</i>	<i>E04</i>	<i>E05</i>	<i>E06</i>
$U_{30,S(22 \text{ a } 27)} (\times 10^{-3} \text{ m/s})$	0.57	1.34	0.57	2.11	0.71	2.36

Para um mesmo caudal, verificou-se um aumento da velocidade sempre que a inclinação utilizada no ensaio foi maior (0.57//1.34, 0.57//2.11 e 0.71//2.36 mm/s, respetivamente para as inclinações de 0.5 % e 1 %, com os caudais de 3 l/s, 5 l/s e 7l/s). Da mesma forma, ensaios com inclinação igual mostraram que a velocidade foi maior para caudais mais elevados (0.57//0.57//0.71 e 1.34//2.11//2.36 mm/s, respetivamente para as inclinações de 0.5 % e 1 %, com os caudais de 3 l/s, 5 l/s e 7l/s), com a exceção da velocidade média dos sedimentos em *E01* e *E03* (0.57 mm/s).

Ordenando de forma crescente os valores da velocidade de escoamento líquido estimados (tabela 4), com os valores correspondentes de cada ensaio das velocidades médias dos sedimentos da tabela 8 obteve-se o gráfico da figura 22.

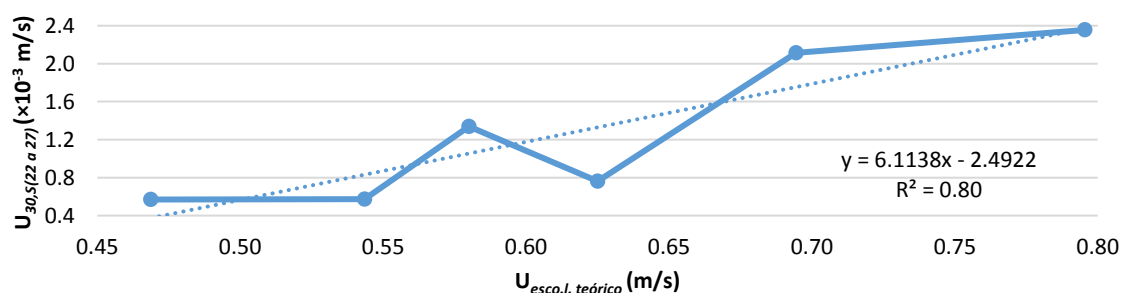


Figura 22 - Relação entre velocidades de escoamento de cada tipo de ensaio ordenadas e velocidade de transporte dos sedimentos do ensaio correspondente

Verifica-se que, apesar do valor da velocidade de escoamento do ensaio *E05* ( $Q=7$  l/s e  $i=0.5\%$ ), ser maior que o do ensaio *E02* ( $Q=3$  l/s e  $i=1\%$ ), 0.63 e 0.58 m/s respetivamente, a velocidade dos sedimentos para o ensaio *E02* (1.34 mm/s) foi maior do que para *E05* (0.76 mm/s). Este comportamento não esperado, poderá relacionar-se com as alturas de sedimentos registadas em cada secção nos momentos de medição.

Para a areia *d2*, as alturas da camada de sedimentos registados no fundo do CH dos ensaios *E13* a *E18*, encontram-se apresentados na figura 23.

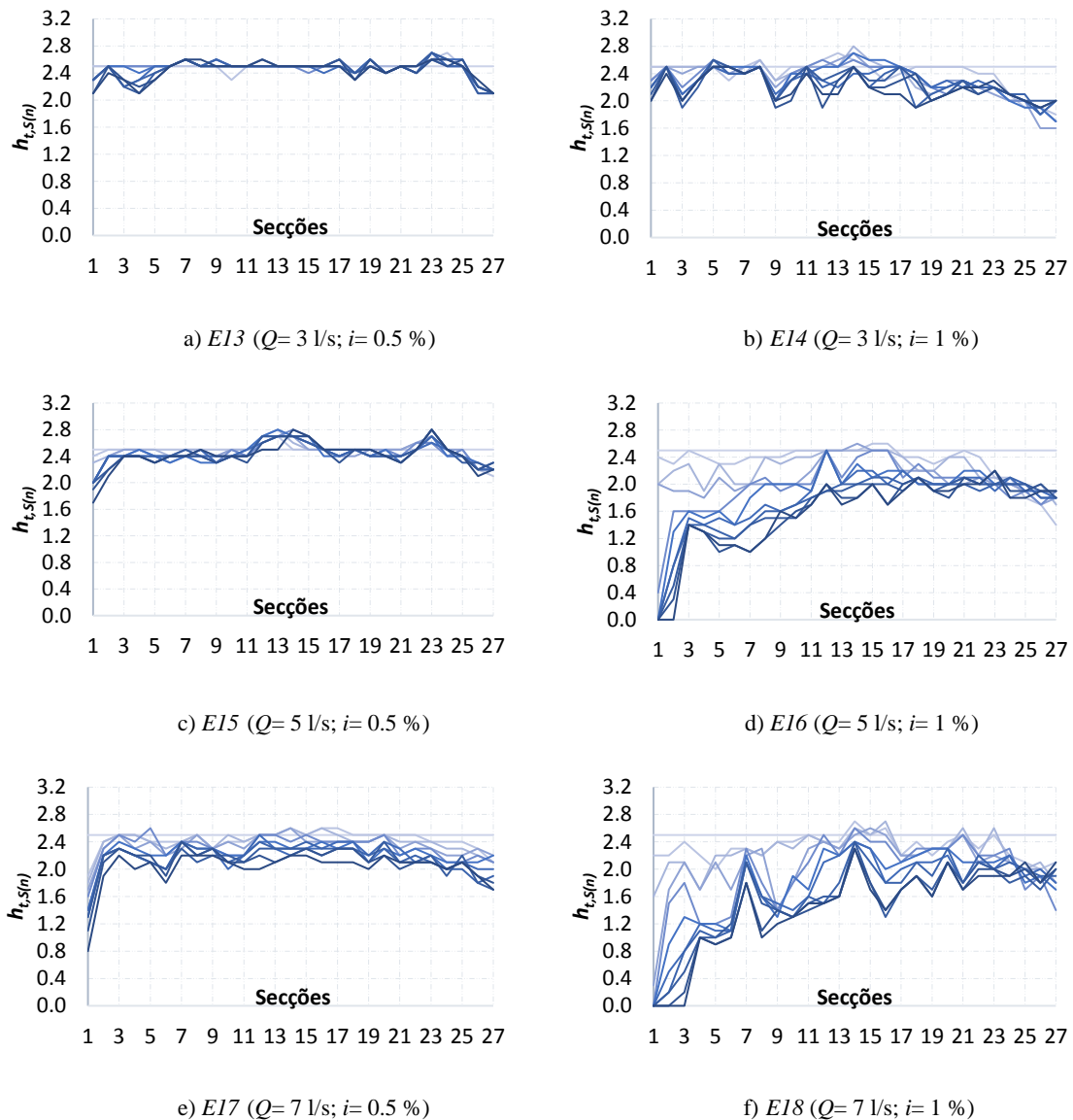


Figura 23 - Alturas registadas,  $h_{t,S(n)}$ , da camada de sedimentos no fundo do CH nas secções nos diferentes instantes de tempo para *E13* a *E18* (cores claras para os instantes iniciais e cores escuras para os instante finais do ensaio)

Tal como para a areia *d1*, os valores registados de alturas da camada de fundo do CH demonstraram um maior abaixamento da camada de sedimentos e como tal, um aumento do transporte sedimentar, sempre que o caudal e/ou inclinação utilizada no ensaio foi maior.

Nestes ensaios também se verificou falta de sedimentos nos trechos a montante, em *E16* e *E18*, contudo, apenas numa pequena extensão do CH e apenas no período final dos ensaios. Em geral, esta areia, com maior diâmetro mediano, apresenta um menor movimento de sedimentos do que a areia *d1*.

As alturas medidas nos ensaios e a aproximação linear correspondente aos ensaios *E13* a *E18*, são representadas na figura 24.

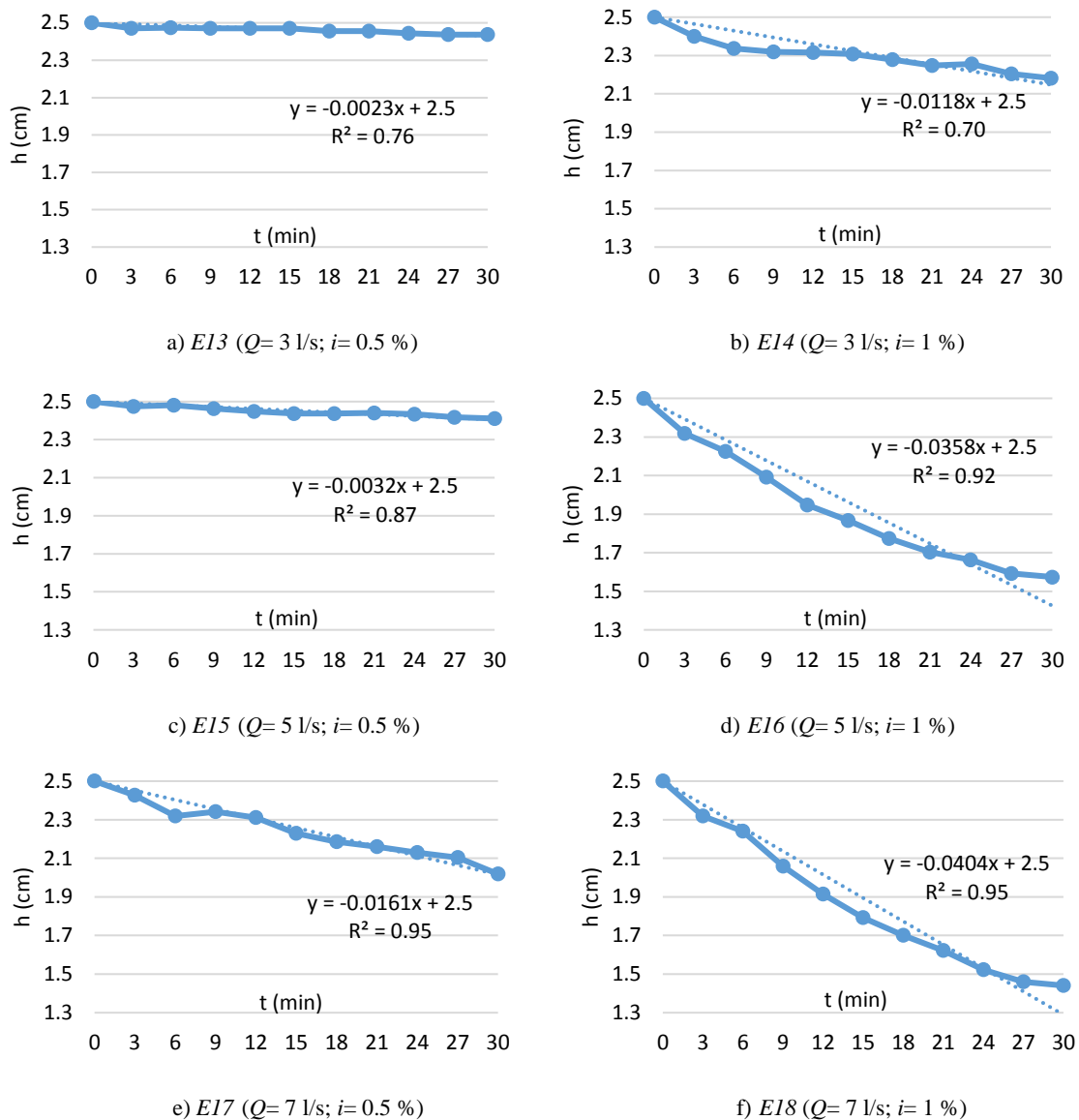


Figura 24 - Alturas medidas (traço cheio) e aproximação linear (tracejado), nos ensaios *E13* a *E18*

Para a areia *d2*, os resultados mais corretos foram obtidos nos ensaios com caudal de 5 e 7 l/s, quer para a inclinação de 0.5 %, quer para a inclinação 1 %. Nestes casos todos com coeficientes de correlação então acima de 86 %, estando três deles (*E16*, *E17* e *E18*) mesmo com valores superiores a 92 %. Ainda assim, os valores do coeficiente de correlação nos

ensaios com caudal de 3 l/s não foram baixos (76.25 % e 70.30 %, respetivamente em *E13* e *E14*).

Na figura 25 são apresentadas as velocidades obtidas para o transporte dos sedimentos no CH, com a areia *d2*.

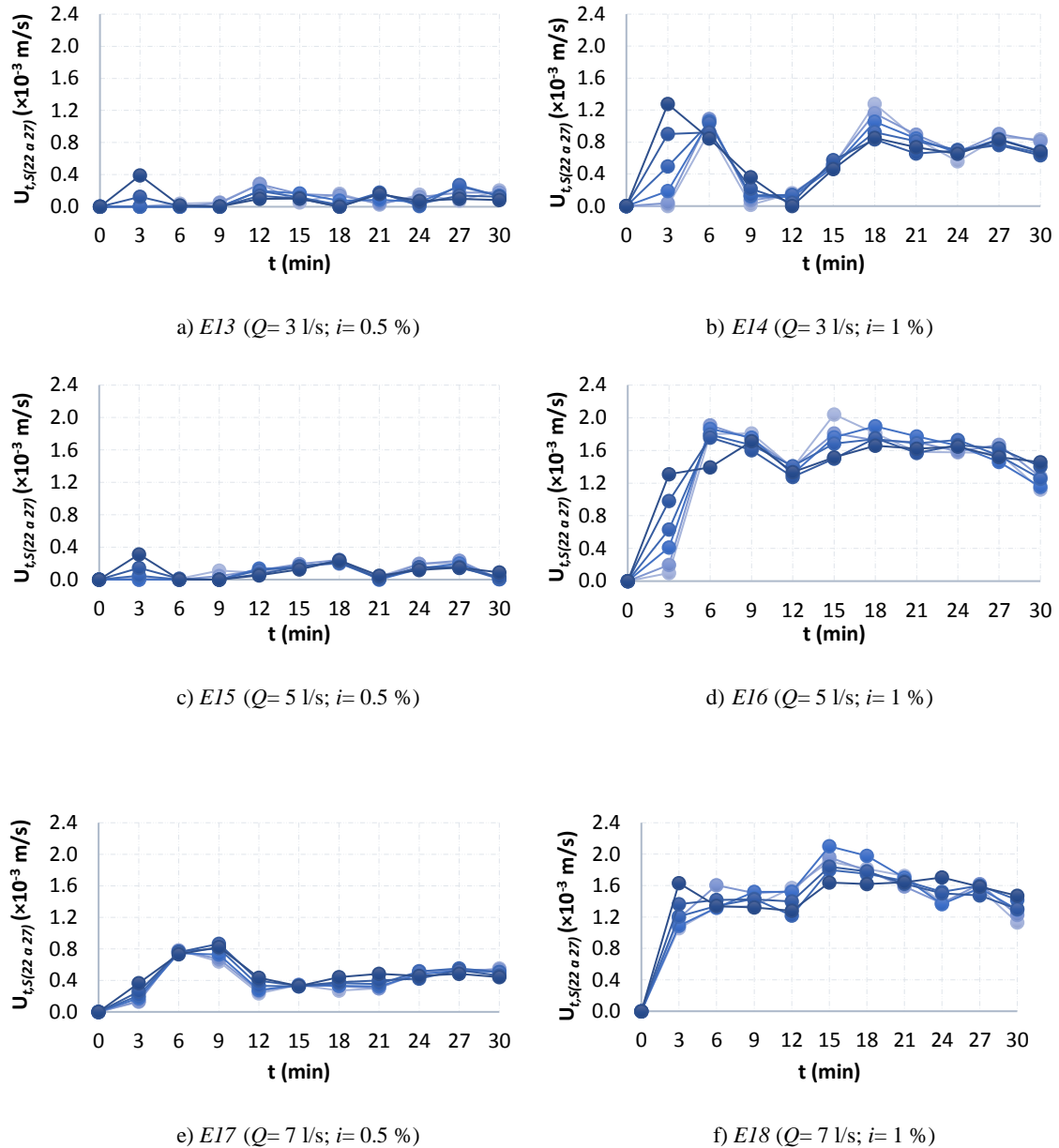


Figura 25 - Velocidade de transporte dos sedimentos em intervalos de tempo de 3 minutos, ao longo dos ensaios *E13* a *E18*, para as secções S22 (claro) a S27 (escuro)

A dispersão de valores de velocidade estimada é maior nos dois ensaios com caudal de escoamento de 3 l/s (*E13* e *E14*) para os minutos 3, 6 e 18, e 3 e 18 respetivamente. No ensaio *E15* também se verificou alguma dispersão de valores para  $t=3$  min. Os restantes ensaios (*E16*, *E17* e *E18*) tiveram um desenvolvimento sem dispersões de assinalar ao

longo do tempo, com valores próximos da velocidade em cada instante, que se deveu mais uma vez a caudais e inclinações mais elevadas.

Procedendo à estimativa da média da velocidade de transporte sedimentar de todas as secções consideradas (S22 e S27) ao longo do tempo de ensaio, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Velocidades médias entre as secções S22 e S27 para os ensaios de E13 a E18

	E13	E14	E15	E16	E17	E18
$U_{30,S(22 \text{ a } 27)} (\times 10^{-3} \text{ m/s})$	0.10	0.62	0.10	1.50	0.46	1.52

Do mesmo modo que para  $d1$ , as velocidades para  $d2$  foram maiores sempre que os caudais de escoamento e as inclinações utilizadas nos ensaios também foram maiores. A exceção a esse comportamento foi, em comparação, os ensaios E13 e E15, ambos com inclinação de 0.5 %, mas com caudais de 3 e 5 l/s respetivamente a apresentarem para o trecho de S22 a S27 uma velocidade média de sedimentos igual de 0.10 mm/s. Ordenando os valores da velocidade de escoamento teóricos da tabela 4, do menor para o maior, relacionando com os valores correspondentes das velocidades médias dos sedimentos de cada ensaio (Tabela 9), obteve-se o gráfico onde também é apresentada a linearização do comportamento (Figura 26).

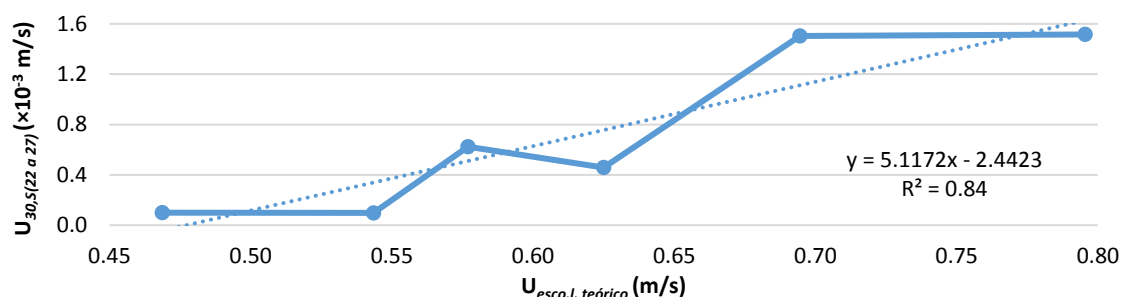


Figura 26 - Relação entre velocidades de escoamento de cada tipo de ensaio ordenadas e velocidade de transporte dos sedimentos do ensaio correspondente

Em geral, a velocidade dos sedimentos aumenta com a velocidade do escoamento. No entanto, verifica-se que, apesar do valor da velocidade de escoamento teórico para o ensaio E17 ( $Q= 7 \text{ l/s}$  e  $i= 0.5 \%$ ), ser maior que o do ensaio E14 ( $Q= 3 \text{ l/s}$  e  $i= 1 \%$ ), 0.63 e 0.58 m/s respetivamente, o valor da velocidade dos sedimentos para o ensaio E14 (0.62 mm/s) foi maior que para E17 (0.46 mm/s).



## 5.2. Ensaio por suspensão

As alturas da camada de sedimentos assente no fundo do CH medidas, para os ensaios de suspensão, *E07* a *E12*, com recurso à areia *d1*, encontram-se discriminadas na figura 27.

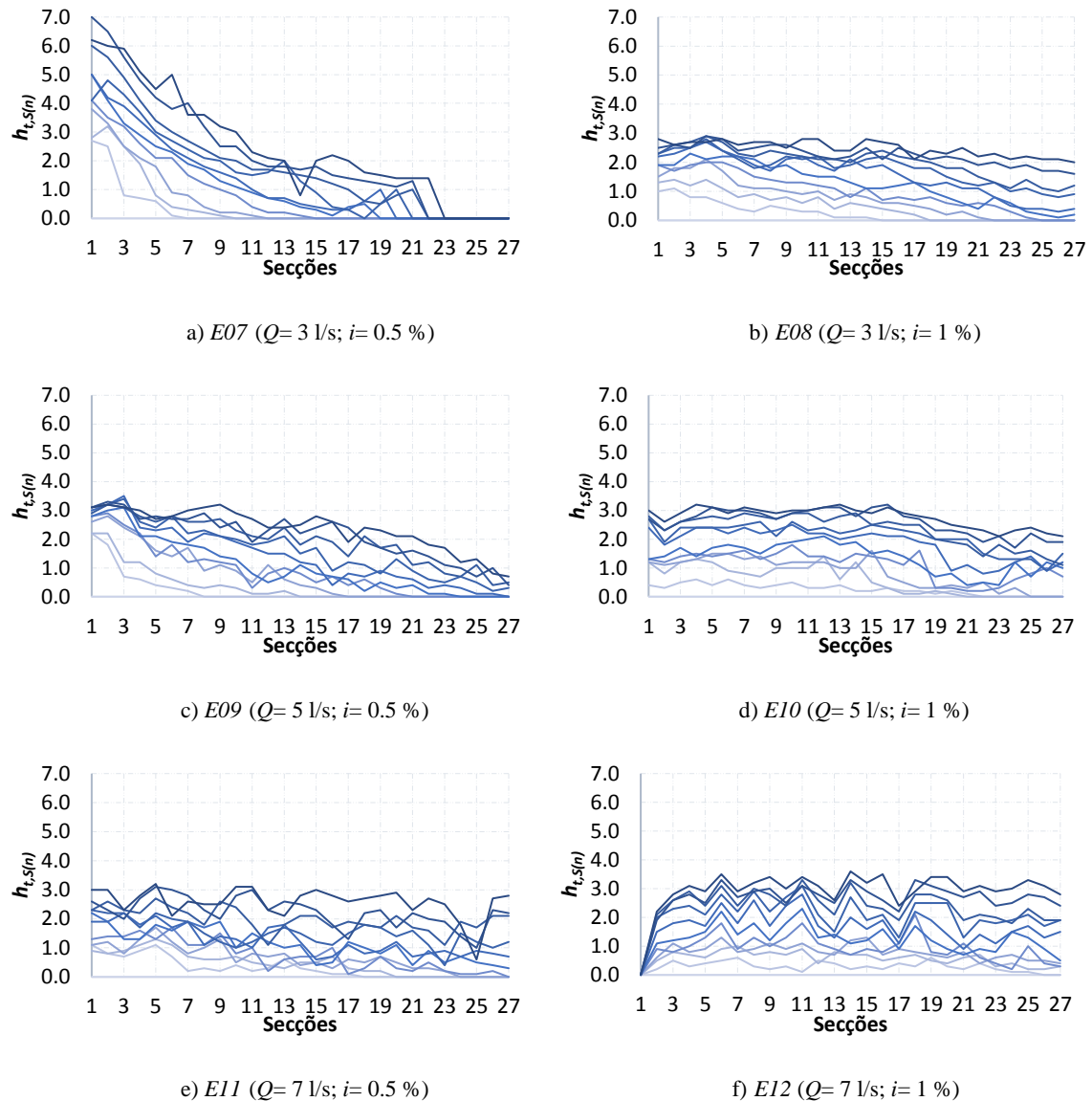


Figura 27 - Alturas registadas,  $h_{t,s(n)}$ , da camada de sedimentos no fundo do CH provenientes da suspensão, nas secções nos diferentes instantes de tempo para *E07* a *E12* (cores claras para os instantes iniciais e cores escuras para os instantes finais do ensaio)

A distribuição sedimentar foi bastante uniforme ao longo do canal e do tempo de ensaio, para todos os ensaios à exceção de *E07*. Neste ensaio, os sedimentos acumularam em *S1* por via das características consideradas, correspondentes a caudal e inclinação mínimos, que não tiveram capacidade de transportar o caudal sólido suspenso, libertado do silo. Em oposição, no ensaio *E12*, correspondente ao caudal e inclinação máximos, os sedimentos em suspensão não assentaram no fundo do canal em *S1*, sendo arrastados de imediato para

trechos a jusante. Foi verificável também que para ensaios com caudais e inclinações mais elevados, obtiveram-se alturas da camada de sedimentos maiores em trechos mais a jusante, explicável pela maior capacidade de transporte destes ensaios. As retas de aproximação aos resultados das alturas medidas referentes aos ensaios em suspensão apresentam-se na figura 28.

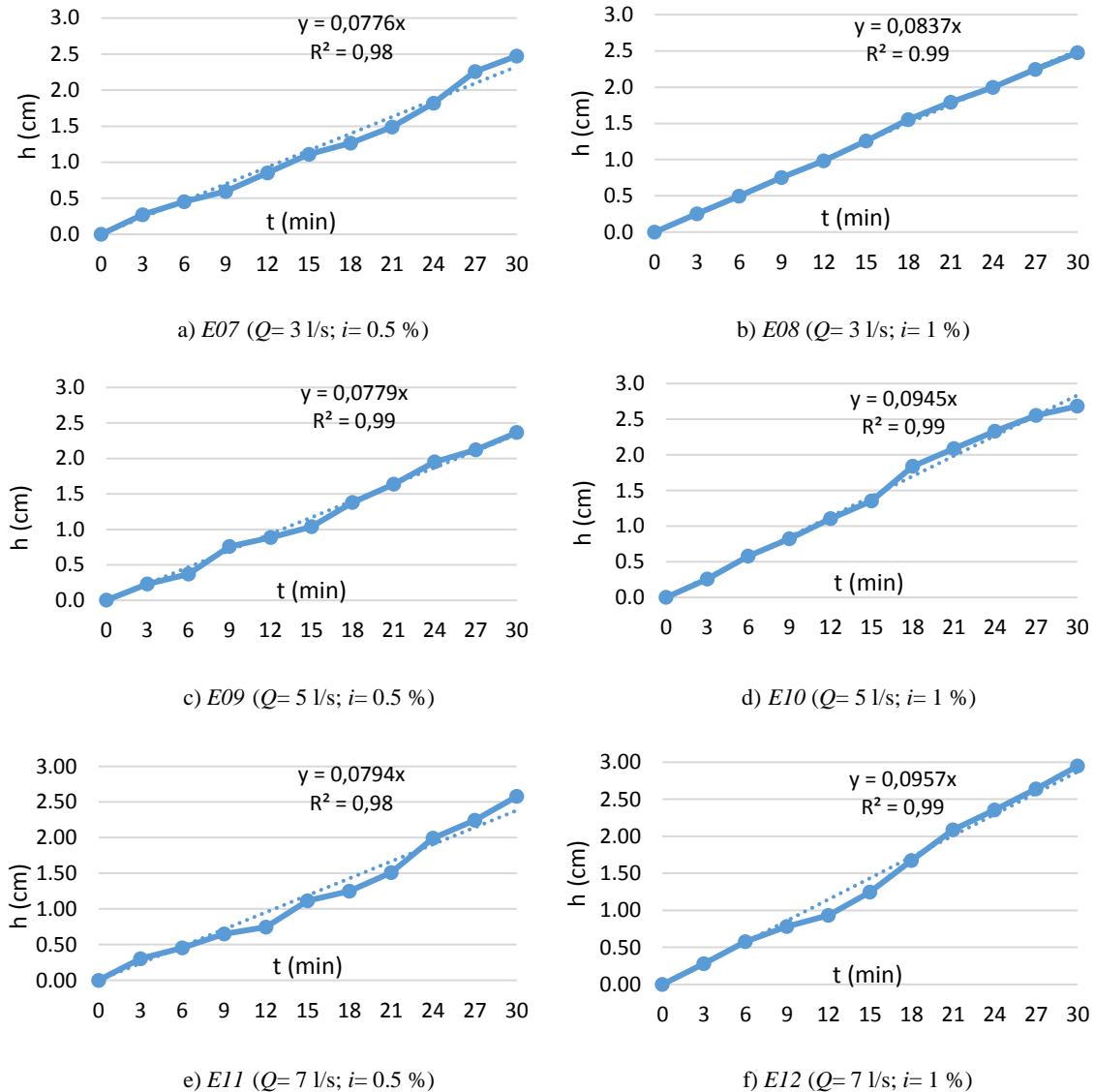


Figura 28 - Alturas medidas (traço cheio) e aproximação linear (tracejado), nos ensaios E07 a E12 realizados no CH

Os coeficientes de correlação obtidos para os ensaios de suspensão foram elevados, todos superiores a 95 %. Apesar das distintas acumulações médias da camada de sedimentos, correspondentes às suas características de ensaio, maiores caudais e inclinações correspondem a maiores acumulações médias nas secções mais a jusante, tendo, de um modo geral, um comportamento semelhante no que às médias de alturas registadas por secção diz respeito.

As velocidades de transporte sedimentar obtidas encontram-se na figura 29.

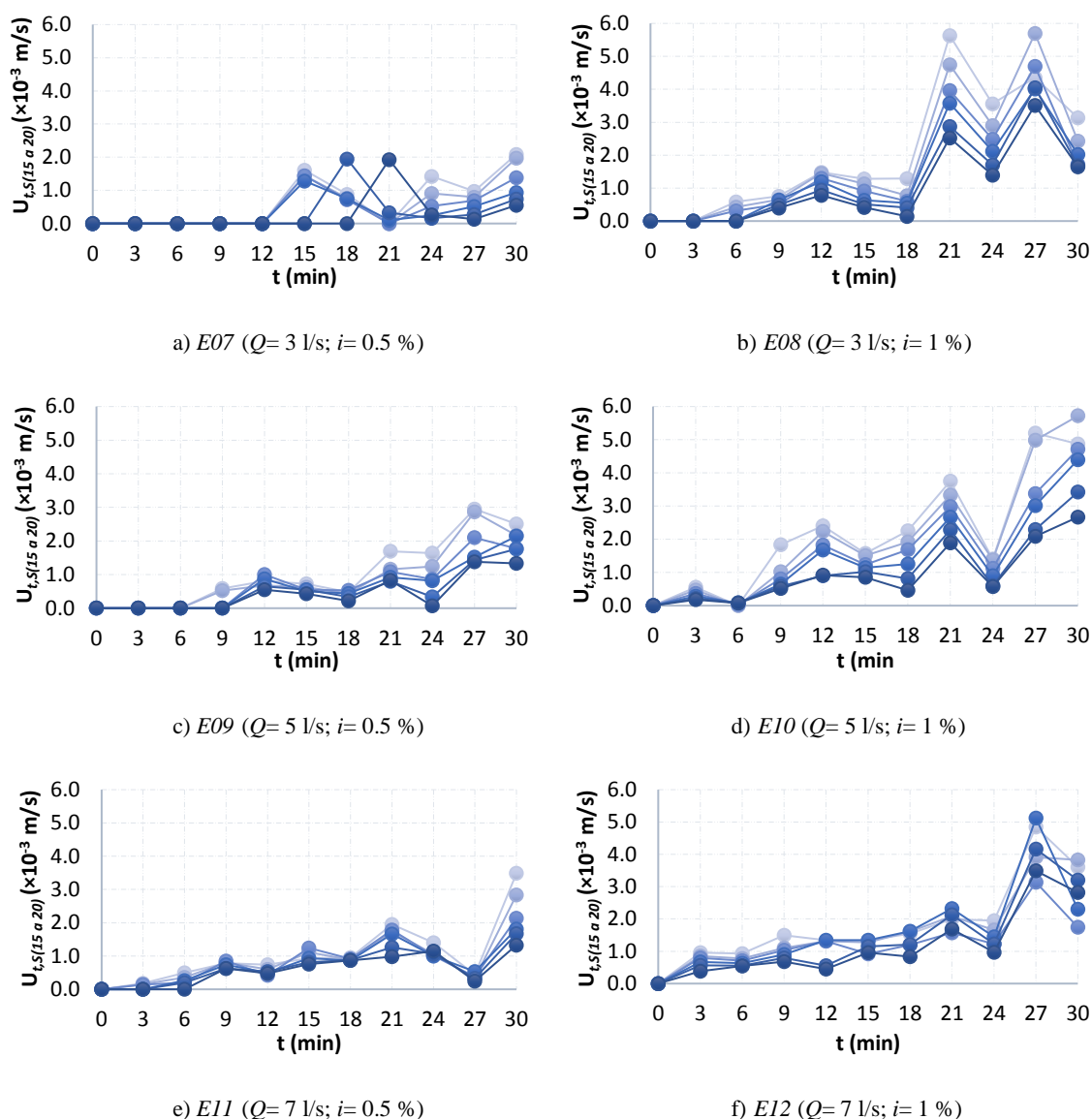


Figura 29 - Velocidade de transporte dos sedimentos em intervalos de tempo de 3 minutos, ao longo dos ensaios *E07* a *E12*, para as secções *S15* (claro) a *S20* (escuro)

As velocidades de transporte dos sedimentos foram tendencialmente mais elevadas para os ensaios com caudais e inclinações maiores. Em todos os ensaios, as velocidades tomaram valores maiores para tempos mais próximos do final, que se deveu ao maior volume de sedimentos a serem transportados (chegada dos sedimentos a jusante, proveniente de secções mais a montante) entre as secções *S15* e *S20*. Nos ensaios *E08* e *E10*, verificou-se um aumento brusco da velocidade nos instantes de tempo  $t=21$  e  $27$  min, enquanto que para *E12* este facto apenas se observou ao minuto 27. É visível sobretudo em *E07* e *E09*, nos tempos iniciais de ensaio, valores de velocidade nulo, consequência da não existência de sedimentos passados no trecho de *S15* a *S20*.

Tabela 10 - Velocidades médias entre as secções *S15* e *S20* para os ensaios de *E07* a *E12*

	<i>E07</i>	<i>E08</i>	<i>E09</i>	<i>E10</i>	<i>E11</i>	<i>E12</i>
$U_{30,S(15 \text{ a } 20)} (\times 10^{-3} \text{ m/s})$	0.46	1.62	0.78	1.72	0.87	1.63

A velocidade dos sedimentos resultou sempre maior para ensaios com inclinações maiores e caudais iguais (*E07*//*E08*, *E09*//*E10* e *E11*//*E12*), registando-se para caudais mais elevados e inclinações iguais (*E07*//*E09*//*E11* e *E08*//*E10*//*E11*) o mesmo comportamento. Este comportamento só não foi observado no ensaio *E12*, pois neste caso o valor médio da velocidade entre *S15* e *S20* (1.63 mm/s) foi menor que em *E10* (1.72 mm/s) (ensaio com menor caudal).

Ordenando por ordem crescente os valores da velocidade de escoamento teóricos, relacionados com os valores correspondentes de cada ensaio das velocidades médias dos sedimentos da tabela 10, obteve-se a figura 30.

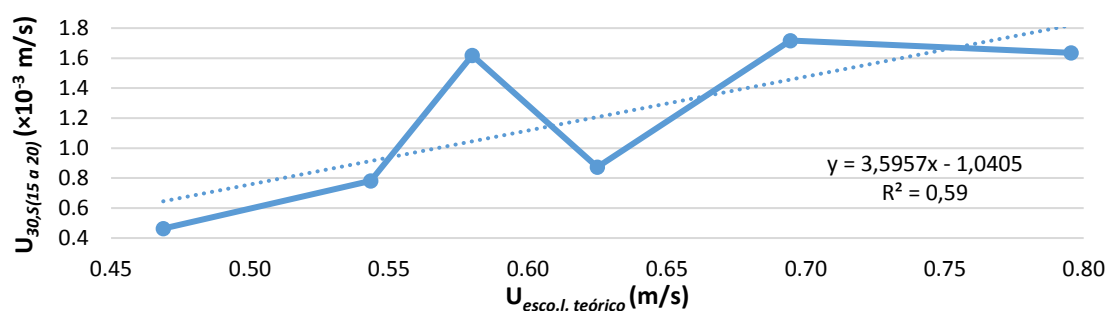


Figura 30 - Relação entre velocidades de escoamento de cada tipo de ensaio ordenadas e velocidade de transporte dos sedimentos do ensaio correspondente

Pela ordem da velocidade de escoamento líquido prevista, os ensaios *E08* e *E12* não corresponderam com valores de velocidade média sedimentar esperados. Em *E08*, o valor foi demasiado elevado (1.62 mm/s), quando deveria ficar situado entre os valores 0.78 e 0.87 mm/s (*E09* e *E11*, respetivamente). No caso de *E12*, o valor ficou abaixo do previsto (1.63 mm/s), pois deveria ter sido o maior valor de velocidade obtido de todos os ensaios, acima de 1.72 mm/s (*E10*).

## Capítulo 6

---

# ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS



## 6. Análise e discussão de resultados

Neste capítulo são apresentadas análises e comparações dos resultados obtidos nos ensaios laboratoriais, para os caudais sólidos e velocidades de transporte sedimentar. Estes resultados são também comparados com formulações numéricas.

### 6.1. Comparação de resultados entre ensaios realizados

Nesta secção apresenta-se a comparação dos resultados obtidos nos ensaios efetuados entre  $d1$  e  $d2$  para arrastamento no fundo, e a comparação dos ensaios de  $d1$  para arrastamento no fundo e em suspensão.

#### 6.1.1. Arrastamento no fundo

Nos ensaios de arrastamento no fundo efetuados com duas areias de diferente calibre,  $d1$  e  $d2$ , verificou-se que a areia mais fina ( $d1$ ) obteve volumes de transporte de sedimentos mais elevados do que a areia mais grossa ( $d2$ ), e, portanto, velocidades de transporte de sedimentos maiores. Ainda assim, nem sempre se verificou um comportamento linear entre volume de transporte sólido e a velocidade sedimentar. Por exemplo, a comparação entre os ensaios  $E14$  e  $E17$ , mostra que o segundo teve um volume sólido transportado maior, mas um valor de velocidade sedimentar média menor entre  $S22$  e  $S27$ .

As linhas que representam o perfil longitudinal da camada de fundo em  $d1$  têm uma maior variação de valores de alturas de sedimentos registadas que em  $d2$ , o que reflete o maior transporte de sedimentos nos ensaios de  $d1$ , como sugerem as figuras 19d e 19f. As figuras também demonstram que a altura de sedimentos passou a zero nos ensaios com  $d1$ , numa maior extensão do CH, o que por sua vez interferiu com a dinâmica de transporte sólido e por conseguinte com os resultados estimados para a velocidade de sedimentos ao longo da extensão seccionada do CH.

Os tipos de areia não influenciaram a coerência de registos, já que os valores do coeficiente de correlação das aproximações lineares às medições se mantiveram na mesma ordem de grandeza. Os coeficientes de correlação foram mais baixos para os ensaios com caudais e inclinações menores. Os ensaios  $E03$  ( $d1$ ) e  $E15$  ( $d2$ ), ambos com caudal de 5 l/s e inclinação de 0.5 %, apresentam respetivamente coeficientes de correlação de 41 % e 87 %, o que indica que o ensaio  $E03$  teve resultados menos coerentes, associado a areia de menor dimensão e com mais transporte sedimentar. Pode-se afirmar então que os ensaios com maiores caudais e inclinações obtiveram maior coerência de resultados. O abaixamento

médio que resulta da aproximação linear foi coerente com o expectável, ou seja, para os ensaios da areia mais fina obtiveram-se valores maiores, intrinsecamente relacionado com o maior volume de sedimentos transportados. Consequentemente, as velocidades obtidas para *d1* foram mais elevadas em comparação com os ensaios de *d2* com as mesmas características. Os valores das velocidades dos sedimentos nas tabelas 8 e 9 mostram que para *d1* as velocidades foram maiores entre 1.4 e 5.7 vezes ao longo dos diferentes ensaios (na média dos seis ensaios, as velocidades de transporte de sedimentos para *d1* foram 3.1 vezes maior) que os valores das velocidades de transporte sedimentar em *d2*. É difícil exercer uma proporcionalidade entre dimensão dos sedimentos, características de ensaio e velocidade de transporte dos sedimentos. Ainda assim, para caudais e inclinações maiores (caudal de 5 l/s com 1 % de inclinação e caudal de 7 l/s com 0.5 % e 1 % de inclinação), os valores aproximaram-se, apresentando em média um valor de velocidade maior em 1.58 vezes.

Tanto para *d1*, como para *d2*, se constatou que apesar dos ensaios *E05* e *E17* (caudal e inclinação igual entre si) terem uma velocidade de escoamento teórica maior que os ensaios *E02* e *E14* (caudal e inclinação igual entre si), que faria supor uma velocidade de transporte sedimentar final igualmente maior, isso não se confirmou (Figuras 22 e 26). Este resultado pode eventualmente ser explicado por algum erro associado às medições das alturas de sedimentos registadas nos ensaios ao longo do tempo e das secções.

Por último, assumindo um escoamento constante no tempo, pode-se estimar a distância total percorrida por cada uma das areias, para os diferentes ensaios, ao final de um ano,  $L_{st}$ , pela utilização das velocidades de transporte sedimentar das tabelas 8 e 9 (tabela 11).

Tabela 11 - Estimativa da distância anual percorrida por cada uma das areias, *d1* e *d2*, para as diferentes velocidades de escoamento líquido

	$U_{esco.l\ te\acute{o}rico\ (m/s)}$	$L_{st}\ (km/ano)\ (d1)$	$L_{st}\ (km/ano)\ (d2)$
<b><i>Q3i0.5 (E01/E13)</i></b>	0.47	17.96	3.12
<b><i>Q3i1 (E02/E14)</i></b>	0.58	42.23	19.70
<b><i>Q5i0.5 (E03/E15)</i></b>	0.54	18.08	3.08
<b><i>Q5i1 (E04/E16)</i></b>	0.69	66.70	47.47
<b><i>Q7i0.5 (E05/E17)</i></b>	0.63	24.04	14.38
<b><i>Q7i1 (E06/E18)</i></b>	0.80	74.33	47.83

Com base nas equações lineares referentes aos ensaios de cada uma das areias, equações 13 e 14, retiradas das figuras 22 e 26 do capítulo 5, respetivamente pertencentes a *d1* e *d2*, que relacionam as velocidades de transporte sedimentar obtidas pelos ensaios de



arrastamento no fundo e a velocidade de escoamento líquido correspondente, pode-se estimar a velocidade de transporte sedimentar para outros valores de velocidade de escoamento líquido (velocidades de corrente). Na expressão a variável  $x$  representa o valor da velocidade de escoamento, expresso em m/s, sendo o resultado o valor da velocidade de transporte dos sedimentos expressa em mm/s.

$$y = 6.1138x - 2.4922 \quad (13)$$

$$y = 5.1172x - 2.4423 \quad (14)$$

### 6.1.2. Arrastamento no fundo e suspensão

Os ensaios aqui equiparados têm por base métodos diferentes de colocação de areia no CH, que originou perfis longitudinais da camada de fundo com comportamentos específicos totalmente diferentes. Pode-se contudo referir, que para as secções mais a jusante, nos dois tipos de ensaios, as camadas de sedimentos no fundo tendem a tornar-se constantes ao longo do tempo, sem grandes variações de altura.

Os coeficientes de correlação das aproximações lineares das alturas da camada de fundo dos ensaios em suspensão obtiveram valores superiores a 95 %, enquanto que para arrastamento no fundo, os ensaios *E01* e *E03* tiveram respetivamente valores do coeficiente de correlação de 64 % e 41 %, valores baixos em comparação quer com os restantes ensaios de arrastamento, quer com os de suspensão. Ficou assim demonstrado, que em suspensão, os resultados obtidos foram mais elevados para o coeficiente de correlação, que poderá ser explicado pelo diferente método de colocação de areia no CH.

Os trechos escolhidos para comparação da velocidade de transporte sedimentar foram diferentes (entre *S22* e *S27* para arrastamento no fundo e entre *S15* e *S20* para suspensão), mas com o propósito de encontrar nestes dois trechos características semelhantes de dinâmica de ensaio de modo a compararem-se velocidades sedimentares. Verificou-se que estas velocidades não tiveram diferenças de maior, como se pode constatar nas tabelas 8 e 10. A relação entre os valores da velocidade de transporte sedimentar nos ensaios por arrastamento no fundo e suspensão foi de 1.24, 0.83, 0.73, 1.23, 0.82 e 1.45, para o total de seis combinações de caudais e inclinações. Desta forma verificou-se que para suspensão, as velocidades foram maiores em *E02//E08*, *E03//E09* e *E05//E11* e para arrastamento no fundo nos restantes ensaios (*E01//E07*, *E04//E10* e *E06//E12*). Verificou-se também, que a relação entre as velocidades sedimentares foi sempre inferior ao dobro (2 vezes) entre ensaios com as mesmas características.

Já no relacionamento entre as velocidades de transporte sedimentar e as velocidades de escoamento líquido teóricas, figuras 22 e 30, o comportamento geral foi bastante semelhante entre arrastamento no fundo e suspensão. A maior diferença encontra-se nos ensaios de caudal de 7 l/s e inclinação de 1 %, em que por arrastamento no fundo (*E06*), a velocidade sedimentar obteve um valor coerente com o esperado tendo em conta a velocidade de escoamento correspondente, enquanto que para suspensão (*E12*) esse valor foi inferior ao expectável.

Assumindo escoamentos constantes no tempo, a distância total anual percorrida pela areia *dI*, para os ensaios de arrastamento no fundo e suspensão, encontram-se na tabela 12.

Tabela 12 - Estimativa do comprimento total percorrido pela areia *dI*, para os diferentes ensaios de arrastamento no fundo e suspensão, ao longo de um ano, pela velocidade de escoamento líquido correspondente

	$U_{esco.l\ te\acute{o}rico}$ (m/s)	$L_{st}$ (km/ano) (F)	$L_{st}$ (km/ano) (S)
<b>Q3i0.5 (E01/E07)</b>	0.47	17.96	14.61
<b>Q3i1 (E02/E08)</b>	0.58	42.23	51.04
<b>Q5i0.5 (E03/E09)</b>	0.54	18.08	24.63
<b>Q5i1 (E04/E10)</b>	0.69	66.70	54.19
<b>Q7i0.5 (E05/E11)</b>	0.63	24.04	27.57
<b>Q7i1 (E06/E12)</b>	0.80	74.33	51.57

A equação 15, refere-se à equação linear formulada pelos ensaios de suspensão, com um coeficiente de correlação de 59 %, enquanto que para arrastamento no fundo, a equação já foi apresentada anteriormente (equação 13).

$$y = 3.5957x - 1.0405 \quad (15)$$

## 6.2. Comparação com fórmulas de transporte sedimentar

No capítulo 3, foi referida a folha de cálculo realizado por Português (2008), que foi utilizada nesta secção como ponto de controlo para os caudais sedimentares obtidos nos ensaios efetuados para arrastamento no fundo e suspensão,  $q_t$ . Os ensaios realizados tanto para arrastamento no fundo como para suspensão serão comparados apenas com a formulação referente ao transporte total, por se considerar que apesar da designação adaptada para os ensaios, em ambos os tipos de ensaios existiram as componentes de arrastamento e suspensão.

Em primeiro lugar foi necessário enquadrar as características e condições de ensaio com os intervalos de valores de algumas variáveis comuns a todas as fórmulas de transporte sedimentar, referidos na tabela 1. Os valores dessas variáveis consideradas nos ensaios

apresentam-se na tabela 13. A profundidade ( $d$ ) corresponde aos valores de altura de escoamento calculados na tabela 4.

Tabela 13 - Valores usados nos ensaios laboratoriais para os diferentes parâmetros comuns a todas as fórmulas

	Profundidade $d$ (m)	Inclinação $i$ (%)	Diâmetro das partículas $d_s$ (mm)	Velocidade de escoamento $U_{esco.}$ (m/s)
<b>Ensaio</b>	Entre 0.013 e 0.028	0.5 e 1.0	0.36 e 0.83	Entre 0.47 e 0.80

As fórmulas de *Ackers and White* (e por consequência também a respectiva fórmula revista) e *Shen and Hung* não foram utilizadas, tendo em conta que dois dos parâmetros (os valores para profundidade e inclinação dos ensaios) ficaram fora dos intervalos impostos para as duas fórmulas. As restantes fórmulas foram utilizadas, apesar da altura do escoamento não cumprir com os pressupostos verificados nos ensaios. Desta forma, decidiu-se comparar os resultados dos ensaios com o caudal sedimentar transportado estimado pelas três fórmulas restantes, *Euglund e Hansen*, *Karim e Kennedy* (e revista) e *Van Rijn*.

### 6.2.1. Arrastamento no fundo

Os resultados dos caudais sólidos totais passados em S27, para os ensaios de arrastamento no fundo, são apresentados nas tabelas 14 e 15, em comparação com o resultado das formulações numéricas.

Tabela 14 - Comparação de resultados do caudal sedimentar transportado para os ensaios por arrastamento no fundo de  $d1$  com fórmulas escolhidas da folha de cálculo

	$q_t (\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$					
	<b>E01</b>	<b>E02</b>	<b>E03</b>	<b>E04</b>	<b>E05</b>	<b>E06</b>
<b>Resultados Laboratoriais</b>	3.8	9.4	5.9	17.0	8.7	25.0
<b><i>Euglund e Hansen</i></b>	5.8	18.0	10.0	39.0	19.0	70.0
<b><i>Karim e Kennedy</i></b>	3.7	11.0	7.5	25.0	13.0	44.0
<b><i>Karim e Kennedy revista</i></b>	5.3	15.0	11.0	34.0	20.0	49.0
<b><i>Van Rijn</i></b>	5.0	130.0	92.0	270.0	160.0	470.0

Tabela 15 - Comparação de resultados do caudal sedimentar transportado para os ensaios por arrastamento no fundo de  $d2$  com fórmulas escolhidas da folha de cálculo

	$q_t (\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$					
	<b>E13</b>	<b>E14</b>	<b>E15</b>	<b>E16</b>	<b>E17</b>	<b>E18</b>
<b>Resultados Laboratoriais</b>	0.8	5.1	1.2	15.0	6.6	17.0
<b><i>Euglund e Hansen</i></b>	3.8	12.0	6.6	26.0	12.0	46.0
<b><i>Karim e Kennedy</i></b>	2.4	7.2	4.7	15.0	7.6	24.0
<b><i>Karim e Kennedy revista</i></b>	2.5	7.7	5.6	18.0	10.0	32.0
<b><i>Van Rijn</i></b>	240.0	760.0	310.0	1100.0	460.0	1600.0

Os valores registados do caudal sólido transportado nos ensaios realizados para *d1*, são, à excepção de *E01*, inferiores a qualquer valor apresentado pelas fórmulas de cálculo. Verifica-se também que a fórmula de *Karim e Kennedy* é sempre a que indica valores mais próximos dos obtidos no laboratório, isto porque é a que apresenta em comparação com as restantes fórmulas, os valores mais baixos de caudal sólido total, em oposição à fórmula de *Van Rijn*, que aponta invariavelmente para os caudais mais elevados. Em *E01*, o resultado laboratorial é superior em  $0.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  ao valor que resulta da expressão de *Karim e Kennedy*, ou seja, maior em 2.7 %, estando por isso na mesma ordem de grandeza. Nos restantes ensaios (*E02*, *E03*, *E04*, *E05* e *E06*) o caudal registado foi sempre inferior ao de *Karim e Kennedy*, respetivamente com diferenças de  $1.6 \times 10^{-6}$ ,  $1.6 \times 10^{-6}$ ,  $8.0 \times 10^{-6}$ ,  $4.3 \times 10^{-6}$  e  $19.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , que equivale a um valor da fórmula superior em 17.0 %, 27.1 %, 47.1 %, 49.1 % e 76.0 %, respetivamente.

Para *d2*, verifica-se novamente que os valores mais próximos dos obtidos são para *Karim e Kennedy*, com caudais mais elevados e distanciados para a fórmula de *Van Rijn*. Em *E16* o caudal sólido total teve o mesmo valor para o resultado em laboratório e para *Karim e Kennedy*. Os ensaios *E13*, *E14*, *E15*, *E17* e *E18* têm valores inferiores a *Karim e Kennedy*, com diferenças de resultado respetivamente de  $1.6 \times 10^{-6}$ ,  $2.1 \times 10^{-6}$ ,  $3.5 \times 10^{-6}$ ,  $1.0 \times 10^{-6}$  e  $7.0 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde a caudais da fórmula superiores em 197.5 %, 41.2 %, 291.7 %, 15.2 % e 41.2 %, respetivamente.

De maneira genérica, as fórmulas sobreestimaram o resultado dos ensaios. Invariavelmente, os resultados mais próximos são apresentados pela fórmula de *Karim e Kennedy*. Uma das possíveis explicações para este acontecimento, será a não distinção na formulação (equação 04) entre o caudal sedimentar transportado por arrastamento no fundo e por suspensão, havendo apenas o caudal total, que poderá levar a valores de caudais sedimentares mais baixos, ao contrário, por exemplo, da formulação de *Van Rijn* (equações 06, 07 e 08), em que a distinção destes dois tipos de transporte sedimentar é realizada para o cálculo final do caudal de transporte sedimentar total. Uma outra possibilidade, são os intervalos com uma maior gama de valores para as diferentes características da tabela 13 suportado pela fórmula de *Karim e Kennedy* (tabela 1), tornando esta formulação mais genérica.

### **6.2.2. Suspensão**

Os resultados adquiridos para os caudais sólidos totais passados na secção *S20*, para os ensaios em suspensão, apresentam-se na tabela 16.

Tabela 16 - Comparação de resultados do caudal sedimentar transportado para os ensaios por suspensão de *dl* com fórmulas escolhidas da folha de cálculo

	$q_t (\times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s})$					
	<i>E07</i>	<i>E08</i>	<i>E09</i>	<i>E10</i>	<i>E11</i>	<i>E12</i>
<b>Resultados Laboratoriais</b>	3.4	9.2	6.7	10.5	9.4	12.4
<i>Euglund e Hansen</i>	5.8	18.0	10.0	39.0	19.0	70.0
<i>Karim e Kennedy</i>	3.7	11.0	7.5	25.0	13.0	44.0
<i>Karim e Kennedy revisto</i>	5.3	15.0	11.0	34.0	20.0	49.0
<i>Van Rijn</i>	5.0	130.0	92.0	270.0	160.0	470.0

Os resultados, são à semelhança com o verificado para os ensaios de arrastamento no fundo, inferiores aos valores apresentados pelas fórmulas de cálculo, sendo a fórmula de *Karim e Kennedy* a que apresentou valores mais próximos dos obtidos no laboratório. Nos ensaios (*E07*, *E08*, *E09*, *E10*, *E11* e *E12*) o caudal registado foi sempre inferior ao de *Karim e Kennedy*, respetivamente com diferenças de  $0.3 \times 10^{-6}$ ,  $1.8 \times 10^{-6}$ ,  $0.8 \times 10^{-6}$ ,  $14.5 \times 10^{-6}$ ,  $3.6 \times 10^{-6}$  e  $31.6 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ , que equivale a um valor da fórmula superior em 8.8 %, 19.6 %, 11.9 %, 138.1 %, 38.3 % e 254.8 % respetivamente.

As prováveis explicações para estes resultados, vão ao encontro dos esclarecimentos feitos no subcapítulo anterior, em relação ao transporte sedimentar por arrastamento no fundo.



## Capítulo 7

---

# CONSIDERAÇÕES FINAIS





## 7. Considerações finais

Nesta dissertação foram efetuados ensaios laboratoriais (modelo físico com fundos móveis) de modo a obter uma estimativa dos valores da velocidade de transporte sedimentar em função de diferentes condições e características de escoamento, ou seja, diferentes areias, métodos de colocação sedimentar no CH, caudais e inclinações. O controlo dos resultados laboratoriais recaiu sobre as alturas da camada de fundo de sedimentos ao longo do canal, dividido em 27 secções e ao longo de um período de tempo total de 30 minutos. Foram feitas análises comparativas entre ensaios e análises comparativas com formulações numéricas existentes. Neste capítulo apresenta-se, um resumo do trabalho desenvolvido, as principais conclusões retiradas e propostas de trabalhos futuros a desenvolver no seguimento desta mesma dissertação.

### 7.1. Conclusões

A erosão costeira é hoje em dia um problema emergente, que necessita e requer de soluções que a mitiguem. Existem um conjunto de soluções para proteção costeira, naturais e/ou artificiais, que têm diferentes eficácias nas mais variadas finalidades, desde as dunas, obras longitudinais, esporões ou alimentações artificiais. Contudo, para uma maior perceção do tipo de solução a utilizar, há a necessidade de compreender o processo de erosão costeira no seu todo, e é por esta via que o transporte sedimentar adquire uma importância maior. Processo dinâmico e complexo, devido às imensas variáveis inerentes, é de difícil previsão. Foi por este motivo que se decidiu estudar isoladamente uma das partes do processo, a velocidade do transporte sedimentar, permitindo contribuir para a compreensão de ações de mitigação do problema da erosão costeira.

O trabalho efetuado sobre a velocidade do transporte sedimentar consistiu num conjunto de ensaios laboratoriais. Por sua vez, estes ensaios subdividiram-se em dois tipos de colocação de sedimentos no CH, arrastamento no fundo e suspensão. O primeiro baseou-se em doze ensaios, seis com uma areia de características próprias designada  $d1$  e os restantes seis ensaios com uma outra areia designada  $d2$ . O segundo tipo de colocação dos sedimentos baseou-se em seis ensaios com utilização apenas de  $d1$ . As condições de ensaio foram iguais para cada uma das três séries de seis ensaios, recorrendo-se a caudais de 3, 5 e 7 l/s emparelhados com inclinações do CH de 0.5 e 1 %. Estes ensaios foram realizados, não antes de se proceder a testes de repetibilidade que permitiram apurar uma consistência teórica e prática passível da sua execução. O ponto de partida comum a todos os ensaios,

foram os registos das alturas da camada de sedimentos no fundo. A análise mais superficial, capítulo 5, incidiu nos perfis longitudinais adquiridos pela camada de sedimentos no fundo ao longo do canal e do tempo de ensaio, na aproximação linear realizada das alturas registadas, das velocidades sedimentares obtidas em trechos seleccionados e da tentativa de estimativa da velocidade do transporte sedimentar tendo como relação a velocidade de escoamento líquido correspondente (dependente das condições e características de ensaio, caudal e inclinação).

Na generalidade dos casos, as velocidades sedimentares registadas foram maiores para caudais e inclinações mais elevadas. Mais particularmente, para arrastamento no fundo, verificou-se que as velocidades de transporte sedimentar foram maiores nos ensaios com areia  $d1$ , em comparação com os ensaios de  $d2$ , sendo  $d1$  de dimensão menor que  $d2$ . Assim, pode-se constatar que sedimentos de menor dimensão são transportados com uma maior velocidade, pela média de ensaios com uma velocidade 3.1 vezes maior. Para suspensão, os valores de velocidade do transporte sedimentar foram similares aos valores para a mesma velocidade nos ensaios de arrastamento no fundo, ambos com  $d1$ , podendo-se considerar ensaios semelhantes no que à velocidade sedimentar diz respeito. Assumindo condições constantes ao longo de um ano, em arrastamento no fundo, com  $d1$ , para as diferentes condições de caudais e inclinações usadas, obtiveram-se valores no intervalo entre 17.96 e 74.33 km/ano, já com  $d2$  o intervalo foi entre 3.12 e 47.83 km/ano. Em suspensão (com  $d1$ ), os valores situaram-se entre 14.61 e 51.57 km/ano.

Com o objetivo de mais um ponto de controlo da coerência teórica dos ensaios, comparou-se os resultados dos caudais sólidos passados nas últimas secções do CH (arrastamento no fundo em S27 e suspensão em S20). Constatou-se que, em tendência quase invariável, os volumes passados obtidos nessas secções foram mais baixos do que quaisquer valores apresentados pelas formulações numéricas existentes de diversos autores. Contudo, a formulação indicada por *Karim e Kennedy*, formulação esta com os valores apresentados mais baixos, destacou-se pela semelhança com os valores obtidos em ensaio, havendo assim uma formulação capaz de tornar coerentes os resultados alcançados em laboratório.

Por último, destacar as equações lineares obtidas para  $d1$  (arrastamento no fundo e suspensão) e para  $d2$  (arrastamento no fundo), equação 13, 15 e 14 respetivamente, que permitem relacionar a velocidade de escoamento líquido teorizada com a velocidade do transporte sedimentar para outros valores diferentes da velocidade de escoamento líquido.

## **7.2. Desenvolvimentos futuros**

Este trabalho pode servir de uma forma mais pertinente, a estudos futuros que relacionem o que aqui foi desenvolvido com alimentações artificiais, através da correspondência dos valores obtidos da velocidade do transporte sedimentar para as condições efetuadas, com as reais condições existentes em zona costeira, tais como alturas de onda, ângulos de incidência, calibre sedimentar, tipos de transporte sedimentar (longitudinal e transversal) entre outros, com uma possível finalidade última de percepção do tempo de recarga das alimentações artificiais.

Por outro lado, pode servir como suporte para estudos mais específicos e isolados, nomeadamente apenas o estudo dos tipos de transporte sedimentar existentes, em conjunto ou separadamente, com o objetivo, como já dito anteriormente, de englobar vários estudos isolados de diferentes especificidades num conjunto combinado, obtendo assim uma ideia geral suportada de todo o processo. De um modo prático, numa das vertentes a continuação deste trabalho laboratorial, efetuando novos ensaios, conjugando por exemplo, no mesmo ensaio os dois tipos de colocação de sedimentos no CH (arrastamento no fundo com suspensão), para verificação da sua compatibilização e dinâmica sedimentar, sendo possivelmente também, uma das formas de minimizar o problema averiguado da falta de sedimentos, associada aos ensaios por arrastamento no fundo. Por outro lado, um trabalho de campo, com recurso a traçadores ou areias marcadas, poderá permitir avaliar a velocidade do transporte das areias no litoral, possibilitando assim, calcular quais as velocidades sedimentares médias anuais e, por conseguinte, cruzar esses resultados com os valores alcançados neste trabalho para essa matéria. Um outro desenvolvimento futuro, poderá passar por a execução de testes numéricos para obter velocidades de transporte de sedimentos, e assim, tentar avaliar alguma correspondência com os valores obtidos nos ensaios laboratoriais deste trabalho.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---



## Referências bibliográficas

**Arthurton, R. (1995).** “Implications of Physical Environmental Change for Coastal Zone Management”; Coastal Change '95, Proceedings of the International Conference on Coastal Change, Bordeaux, pp. 761-764.

**Atkins, R.J. (1993).** “Sediment Suspension Under Irregular “groupy” Waves: a Laboratory Experiment”; Unpublished Master of Science thesis, University of Toronto, Toronto, 219 p.

**Brink, K.H. (1991).** “Coastal-trapped Waves and Wind-driven Currents Over the Continental-shelf”; Annu. Rev. Fluids Mech. 23, pp. 389–412.

**Cardoso, A.H. (1981).** “Hidráulica Fluvial”; Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 314 p.

**Castelle, B., Michallet, H., Marieu, V., Leckler, F., Dubardier, B., Lambert, A., Berni, C., Bonneton, P., Barthélemy, E., Bouchette, F. (2010).** “A Large Scale Laboratory Experiment of Rip Current Circulations over a Movable Bed: Drifter Measurements”; Proceedings of Coastal Dynamics 2009, pp. 1-15.

**CEDREN (2016).** “Center for Environmental Design of Renewable Energy”; Visitado em novembro de 2016.

<http://www.hydrologiraadet.no/wp-content/uploads/2014/10/10.Zinke.pdf>

**CERC (2001).** “Shore Protection Manual, Vol. 1”; DC: U.S. Army Corps of Engineers, Coastal Engineering and Research Center, U.S. Government Printing Office.

**Coelho, C. (2005).** “Riscos de Exposição de Frentes Urbanas para Diferentes Intervenções de Defesa Costeira”; Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 404 p.

**Dalrymple, R.A. (1985).** “Introduction to Physical Models in Coastal Engineering”; in Physical Modelling in Coastal Engineering, R.A. Dalrymple, Ed., A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 567-588.

**Dean, R. G., (1995).** “Advances in Coastal and Ocean Engineering”; Ed. Philip L.-F. Liu Vol. 1, World Scientific, Singapore, pp. 159-221.

**Fredsoe, J., Deigaard, R. (1992).** “Mechanics of Coastal Sediment Transport”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 3, World Scientific, Singapore, 369 p.

**Gill, A.E. (1984).** “On the behavior of internal waves in the wakes of storms”; J. Phys. Oceanogr. 14, pp. 1129–1151.

**Guimarães, A. (2014).** “Ensaio em Modelo Físico e Numérico do Impacto de um Esporão”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 111 p.

**Heinz Center, (2000).** “Evaluation of Erosion Hazards”; Washington, DC: H. John Heinz III Center for Science, Economics and the Environment, pp. 428-432 (citado em Schwartz, 2005).

**Hughes, S.A. (1993).** “Physical Models and Laboratory Techniques in Coastal Engineering”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 7, World Scientific, Singapore, 588 p.

**IPQ (2000).** “NP EN933-1. Ensaio das Propriedades Geométricas dos Agregados”; Parte 1: Análise Granulométrica. Método de Peneiração; Caparica, Portugal: Instituto Português de Qualidade.

**Kamphuis, J. W. (1991).** “Physical Modelling”; in Handbook of Coastal and Ocean Engineering, J.B. Herbich, Ed., Vol 2, Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

**Kamphuis, J. W. (2000).** “Introduction to Coastal Engineering and Management”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 16, World Scientific, Singapore, 472 p.

**Karamisheva, R.D., Lyness, J.F., Myers, W.R.C., Cassells, J.B.C., O’Sullivan, J.J. (2006).** “Sediment Transport Formulae for Compound Channel Flows”; Institution of Civil Engineers, University College Dublin, Proceedings of the ICE – Water Management, 159 (3), pp. 183-193.

**Keulegan, G.H. (1966).** “Model Laws for Coastal and Estuarine Models”; in Estuary and Coastline Hydrodynamics, A.T. Ippen, Ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, pp. 691-710.

**Kraus, N., Gingerich, K., Kriebel, D. (1991).** “Coastal Sediments ’91”; Published by the American Society of Civil Engineers, Vol. 1, New York, 1206 p.

**Kraus, N. (2005).** “Shore Protection Structures”; Encyclopedia of Coastal Science, edited by Maurice L. Schwartz 2005, Springer, The Netherlands, pp. 875-433.

**Le Méhauté, B. (1990).** “Similitude”; in Ocean Engineering Science, B. Le Méhauté, Ed., Vol. 9, Part B in the series The Sea, John Wiley and Sons, New York, pp. 955-980.



**Nielsen, P. (2009).** “Coastal and Estuarine Processes”; Advanced Series on Ocean Engineering, Vol. 29, World Scientific, Singapore, 360 p.

**Português, C. (2008).** “Programação de Modelos de Transporte Sedimentar: Comparação de Soluções”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 88 p.

**Rampino, M. R. (2005).** “Erosion Processes”; Encyclopedia of Coastal Science, edited by Maurice L. Schwartz 2005, Springer, The Netherlands, pp. 432-433.

**Ribeiro, B. (2009).** “Efeito das Barragens no Transporte Sedimentar Fluvial”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 82 p.

**Rodrigues, L. (2010).** “Gestão de Sedimentos na Zona Costeira – Alimentações Artificiais”; Tese de Mestrado, Universidade de Aveiro, 97 p.

**Sato, S. (2000).** “Sediment Transport and Beach Profile Change due to Random Waves”; in Handbook of Coastal Engineering, J.B. Herbich, Ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 7 chap.

**Schwartz, M.L. (2005).** “Encyclopedia of Coastal Science”; Encyclopedia of Earth Science Series, Department of Geology Western Washington University, WA, USA, Springer, The Netherlands, 1211 p.

**Seymour, R. J. (2005a).** “Cross-Shore Sediment Transport”; Encyclopedia of Coastal Science, edited by Maurice L. Schwartz 2005, Springer, The Netherlands, pp. 352-353.

**Seymour, R. J. (2005b).** “Longshore Sediment Transport”; Encyclopedia of Coastal Science, edited by Maurice L. Schwartz 2005, Springer, The Netherlands, pp. 600-601.

**Silva, J., Ascensão, I. (2008).** “Avaliação das Características do Canal de Hidráulica – Estudos de Descarregadores”, Projeto de Licenciatura, Universidade de Aveiro, Aveiro.

**Silva, R. (2010).** “Avaliação Experimental e Numérica de Parâmetros Associados a Modelos de Evolução da Linha de Costa”; Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 488 p.

**Soulsby, R. (1997).** “Dynamics of Marine Sands”; HR Wallingford, Published by Thomas Telford Publications, Thomas Telford Services Ltd, 1 Heron Quay, London E14 4JD, 249 p.

**Thornton, E.B., Abdelrahman, S.M. (1991).** “Sediment Transport in the Swash due to Obliquely Incident Wind-waves Modulated by Infragravity Waves”; M.S. Thesis, Naval Postgraduate School Monterey (citado em Kraus *et al.*, 1991).

**Van Rijn, L.C. (1984).** “Sediment Transport”; Journal of Hydraulic Engineering, Vol. 110, No 11, ASCE, 2300 p.

**Van Rijn, L.C. (1998).** “Principles of Coastal Morphology”; Aqua Publications, Amsterdam, 736 p.

**Woodroffe, C.D. (2002).** “Coasts, Form, Process and Evolution”; Press Syndicate of the University of Cambridge, The Pitt Building, Trumpington Street, Cambridge, United Kingdom, 90 p.